

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Posouzení provozní spolehlivosti a nákladů na
údržbu elektrobusu SOR

The Assessment of Reliability and
Maintenance Costs of Electrobus SOR

Student:

Matěj Frydrych

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.

Datum odevzdání:

19. 5. 2014

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Matěj Frydrych**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie
Téma: **Posouzení provozní spolehlivosti a nákladů na údržbu elektrobusu SOR**
Assesment of Reliability and Maintenance Costs of Electrobus SOR

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický základ pro zpracování experimentálních dat
3. Posouzení provozní spolehlivosti a nákladů na údržbu
4. Technicko - ekonomické hodnocení
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Famfulík, J. a kol.: Zkoušky spolehlivosti. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2277-8.

Famfulík, J. a kol: Teorie údržby. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na:
<http://homel.vsb.cz/~krz011>

Daněk, A., Šíroky, J: Teorie obnovy dopravních prostředků, Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-568-3

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



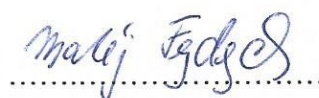
doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2014

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Matěj Fedyš', written over a horizontal dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5.2014

Matěj Frydrych
.....
Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Matěj Frydrych

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Klostermannova 771/20, Ostrava, 709 00

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Frydrych, M. *Posouzení provozní spolehlivosti a nákladů na údržbu elektrobusu SOR: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2014, 55 s. Vedoucí práce: Famfulík, J.

Bakalářská práce se zabývá výpočty provozní spolehlivosti a nákladů na údržbu elektrobusu SOR EBN 10,5. Elektrobusy tohoto typu jsou ve vlastnictví Dopravního podniku Ostrava a.s. V teoretické části práce je uveden základní úvod do statistické matematiky a problematiky spolehlivosti. Na tomto základě jsou získaná data zpracována do potřebné podoby a provedeny výpočty provozní spolehlivosti. Jsou srovnány střední hodnoty ujeté vzdálenosti do poruchy mezi prototypem vozidla a vozidly kusové výroby. Druhou částí bakalářské práce je posouzení nákladů na údržbu a opět jejich porovnání mezi prototypem a vozidly kusové výroby.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Frydrych, M. *The assessment of Reliability and Maintenance Costs of Electrobus SOR: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2014, 55 p. Supervisor: Famfulík, J.

My thesis deals with calculation of operational reliability and maintenance costs of electrobus SOR EBN 10,5. These electrobuses are in ownership of Dopravní podnik Ostrava a.s. The introduction of statistic mathematics and reliability is mentioned in the theoretical part of the thesis. On this basis are gained data processed to the required form and the reliability calculations are done. Mean values of traveled distance to the failure between prototype and piece-production are compared. There are calculations of the assessment of maintenance costs and their comparison in the second part of the bachelor thesis.

Obsah

Seznam použitých značek a zkratek	8
1 Úvod	9
2 Popis zkoumaného elektrobusu	10
3 Základní pojmy ve spolehlivosti	12
3.1 Poruchy, jejich druhy a vanová křivka	13
3.2 Náklady vznikající s požadovanou spolehlivostí výrobků	15
4 Teoretický základ pro zpracování experimentálních dat	17
4.1 Základní charakteristiky náhodných veličin	17
4.1.1 Spojitá náhodná veličina	18
4.1.2 Diskrétní náhodná veličina	19
4.1.3 Charakteristiky pro oba typy náhodných veličin	19
4.2 Vybrané typy rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny	21
4.2.1 Exponenciální rozdělení	21
4.2.2 Normální rozdělení	23
4.2.3 Weibullovo rozdělení	24
4.3 Odhady parametrů Weibullova rozdělení lineární regresí	25
4.4 Test dobré shody Kolmogorov-Smirnov	27
5 Posouzení provozní spolehlivosti	29
5.1 Získání potřebných údajů pro výpočet spolehlivosti	30
5.2 Výpočet parametrů W2P lineární regresí	33
5.3 Vlastní výpočet spolehlivosti	36
5.4 Test dobré shody Kolmogorov-Smirnov	38
5.5 Výsledky výpočtů spolehlivosti	39
6 Posouzení nákladů na údržbu	42
7 Závěr	48
Seznam obrázků	51

Seznam tabulek	52
Seznam použité literatury	53
Seznam příloh.....	54

Seznam použitých značek a zkratek

$D(T)$	Rozptyl náhodné veličiny
D_1	Testovací kritérium testu dobré shody Kolmogorov-Smirnov
$D_{1\max,p}$	Kritická hodnota testu dobré shody Kolmogorov-Smirnov s hladinou významnosti p .
DPO	Dopravní podnik Ostrava a.s.
$E(T)$	Střední hodnota náhodné veličiny
$Ex(\lambda)$	Exponenciální rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny s parametrem λ
$F(t)$	Distribuční funkce náhodné veličiny (závislá na t)
H_0	Nulová hypotéza
H_1	Opačná hypotéza k hypotéze nulové
ISO 9000:2000	Mezinárodní norma řízení kvality
LCC	Life cycle cost (náklady na životní cyklus)
N	Celkový počet poruch
$P(X)$	Pravděpodobnost jevu X
$R(t)$	Doplňk k distribuční funkci náhodné veličiny, spolehlivost (závislá na t)
T_s	Střední hodnota u Weibullova dvouparametrického rozdělení
W2P	Weibullovo dvouparametrické rozdělení pravděpodobnosti
c	Parametr polohy Weibullova rozdělení
e	Eulerovo číslo (2,71828)
ev.č.	evidenční číslo
k	Koeficient (směrnice přímky)
m	Parametr tvaru Weibullova rozdělení
n_i	Pořadové číslo poruchy
$p(x)$	Pravděpodobnostní funkce diskrétní náhodné veličiny (závislá na x)
q	Hodnota posunutí přímky od osy x
t	Obecně zadaná hodnota náhodné veličiny u Weibullova rozdělení pravděpodobnosti
t_0	Parametr měřítka Weibullova rozdělení
μ	Střední hodnota normálního rozdělení náhodné veličiny
$\Gamma(n)$	Gamma funkce
$\lambda(t)$	Intenzita náhodné veličiny (závislá na t)
π	Ludolfovo číslo (3,14159)
σ	Směrodatná odchylka
σ^2	Rozptyl normálního rozdělení náhodné veličiny
χ^2	Chí kvadrát test dobré shody

1 Úvod

Má práce pojednává o spolehlivosti a o nákladech na údržbu vybraného typu dopravního prostředku veřejné dopravy osob, používaného v Dopravním podniku Ostrava a.s. Pro svou práci jsem si zvolil dopravní prostředek s alternativním ekologickým pohonem, jelikož otázka výfukových plynů a znečištění ovzduší je v ostravské lokalitě velmi často pokládána. Alespoň částečným řešením snížení výfukových exhalací by mohlo být masovější využití autobusů na bateriový pohon (dále jen „elektrobus“). Cílem mé bakalářské práce je zhodnocení situace v oblasti provozní spolehlivosti těchto jedinečných vozů a následné porovnání, zda-li došlo ke změnám mezi prototypem a vozidly vyrobenými kusovou výrobou. Na tuto provozní spolehlivost navazují i náklady na údržbu těchto vozidel a proto druhým cílem mé bakalářské práce je zhodnocení těchto provozních nákladů a jejich porovnání mezi prototypem a vozy vyrobenými kusově. K dosažení těchto cílů je potřeba popsat elektrobus z hlediska technického i provozního, uvést teoretický úvod do statistické matematiky, především druhy rozdělení náhodných veličin, a také je nutné zmínit některé základní pojmy týkající se spolehlivosti. Závěrem teoretické části je uveden test dobré shody Kolmogorov-Smirnov, dle něhož jsou testovány hypotézy v praktické části práce. Po tomto úvodu je v praktické části vzorově nastíněn způsob výpočtu provozní spolehlivosti na jednotlivých konstrukčních prvcích elektrobusů a porovnání mezi prototypem a kusově vyrobenými vozy. Následně navazuje výpočet nákladů na údržbu pro jednotlivé vozy a jejich porovnání.

2 Popis zkoumaného elektrobuse

Objektem této bakalářské práce jsou elektrobuses typu SOR EBN 10,5 (viz obr. č. 2.1) které jsou majetkem Dopravního podniku Ostrava a.s. Jedná se o dvounápravová silniční nízkopodlažní vozidla s třídvérovou karosérií určená pro hromadnou přepravu osob. Výrobce je firma SOR Libchavy spol. s r.o., elektrickou trakční výzbroj vyrobila firma Cegelec a.s., elektromotor dodala firma Pragoimex a.s. a zástavbu elektrovýzbroje provedl Dopravní podnik Ostrava a.s. Tyto vozy byly do Ostravy pořízeny za účelem snížení emisí v ovzduší v centru města s vizí, že těchto vozů bude během několika let jezdit několik desítek. Elektrobuses jsou převážně vypravovány v dopravní špičce na linku 38, která spojuje centrum Ostravy s městskými částmi Radvanice a Bartovice a je vedena poměrně členitým terénem.



Obr. č. 2.1: Elektrobus SOR EBN 10,5 [1]

Základní údaje [1]:

Rozměry:

Délka: 10 370 mm

Výška: 2 800 mm

Šířka: 2 525 mm

Přední / zadní převis: 2 350 / 1 700 mm

Nájezdový úhel vpředu / vzadu: 9 / 12 °

Hmotnost provozní / maximální: 10 200 / 16 500 kg

Rozvor náprav: 6 320 mm

Vnější obrysový poloměr: 12 000 mm

Maximální rychlost: 80 km/h

Dojezd: 120 km (pro 2 až 3 zastávky na 1 km)

Pohonný systém:

Elektromotor: TAM 1052 C6B, asynchronní šestipólový, chlazený kapalinou, Pragoimex a.s.

Výkon: 120 kW / 400V AC

Trakční měnič: 3x400 V AC 120 kW, chlazený kapalinou

Trakční akumulátory: Lithium-iontové (FePO_4), 2,5 až 4,5 V / 300Ah, 180 kusů

Podvozek:

Přední náprava: SOR BN 004, nezávislé zavěšení

Zadní náprava: RÁBA, jednostupňová tuhá, hypoidní

Řízení: RBL C 500V, hydraulické monoblokové

Retardér: elektrická brzda s reprodukcí energie

Brzdy: Wabco PAN 19-1, kotoučové, vzduchem ovládané, ABS/ASR - Wabco systém 4S/4M

Pérování: pneumatické, vlnovcové pružiny s hydraulickými tlumiči Brano a.s. - vpředu 2 / vzadu 4, elektronické ovládání Wabco ECAS

Karoserie:

Konstrukce skeletu: celokovová nízkopodlažní, polonosného typu

Uspořádání dveří: dvoje dvoudílné dveře a jedny jednodílné

Šířka dveří 1. /2. /3.: 800/ 1 200/ 1 200/ 1 200 mm

Nástupní výška: 320 mm

Výška podlahy vpředu: 360 mm

Výška podlahy vzadu: 800 mm

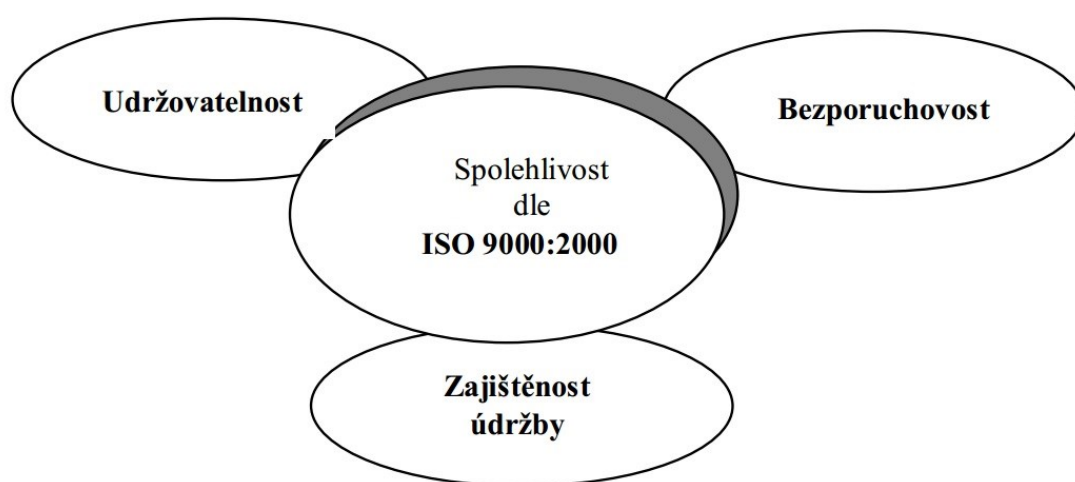
Míst k sezení / stání: 19 / 66

Nezávislé topení: Ebernpächer Hydronic 24, naftové výkon 24 kW

3 Základní pojmy ve spolehlivosti

Definice pojmů byly čerpány z literatury [2,3].

Spolehlivost: Skládá se ze tří základních částí (viz obr. č. 3.1). Spolehlivost zařízení je z velké míry ovlivňována jejich údržbou. Jedná se o obecnou schopnost výrobku plnit požadované funkce po stanovenou dobu v daných podmínkách. Tato schopnost je velkou měrou ovlivňována tím, zda je výrobek udržován či nikoliv. Podle toho, zda je výrobek udržován či nikoliv, lze tyto výrobky rozdělit do dvou základních skupin – obnovované a neobnovované.



Obr. č. 3.1: Spolehlivost dle ISO 9000:2000 [2]

Bezporuchovost: Je to schopnost objektu nepřetržitě plnit požadované funkce za stanovených podmínek po stanovenou dobu. Bezporuchovost lze vyjádřit několika veličinami:

- Intenzita poruch – přírůstek porouchaných výrobků v malém časovém úseku k počtu výrobků fungujících bez závady.
- Střední intenzita poruch – střední hodnota okamžité intenzity poruch v určitém časovém období.
- Střední doba do poruchy – vyjadřuje dobu, za kterou lze očekávat, že se výrobek porouchá.
- Střední doba provozu mezi poruchami – očekávaná doba provozu, během níž nevznikne žádná porucha.

- Pravděpodobnost bezporuchového provozu – pravděpodobnost, že výrobek bude plnit požadované funkce při daných podmínkách v daném čase.

Udržovatelnost: Je to schopnost výrobku setrvat při daných podmínkách v provozuschopném stavu nebo se do něj vrátit, jestliže je prováděna údržba v daných podmínkách za použití stanovených postupů a prostředků. Udržovatelnost hlavně charakterizují:

- Intenzita opravy
- Střední intenzita opravy – střední hodnota okamžité intenzity opravy v daném časovém úseku
- Střední doba do obnovy – očekávaná doba do obnovy
- Střední doba opravy – očekávaná doba opravy

Zajištěnost údržby: Schopnost organizace poskytující údržbářské služby zajišťovat prostředky potřebné pro údržbu v souladu s koncepcí údržby dle požadavků v daných podmínkách.

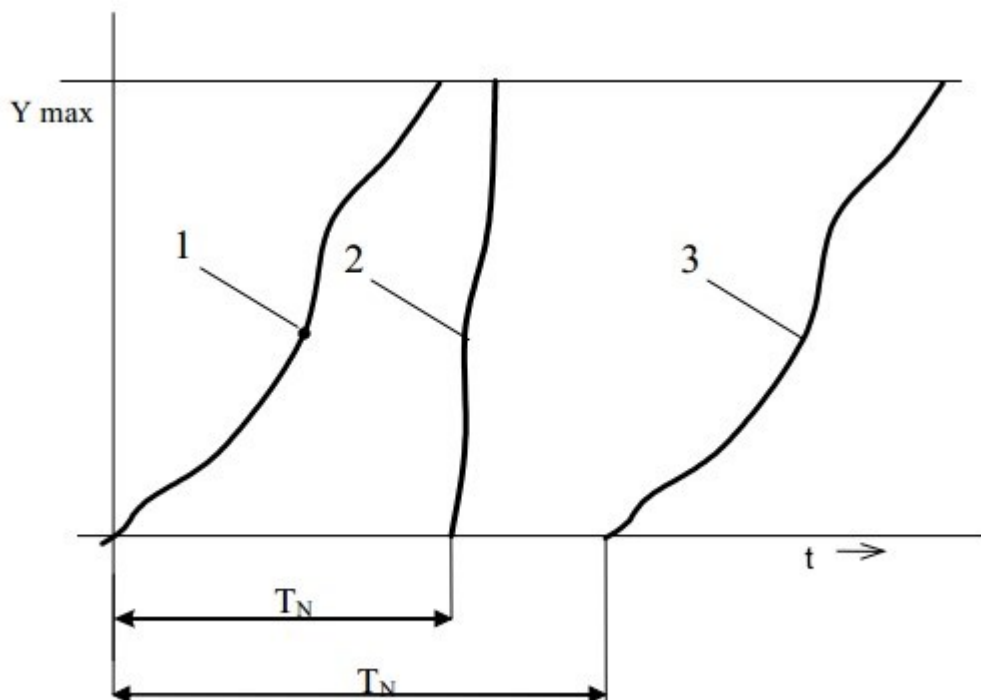
3.1 Poruchy, jejich druhy a vanová křivka

Postupné poruchy: Vznikají postupem času jako důsledek opotřebení, dochází ke zhoršování vlastností výrobku. Tyto poruchy jsou závislé na čase. Každý prvek se opotřebovává jinou rychlostí, to vyjadřuje tzv. rozdělení rychlosti opotřebení. To je způsobeno materiálem, ze kterého je součástka vyrobena, působícím typem namáhání, pracovním prostředím, únavou materiálu aj. Většinou je možné tento proces degradace dobře identifikovat sledovat pomocí údržbových systémů a diagnostiky. Díky pomalosti degradačních procesů máme relativně dostatek času odhalit hrozící poruchu a poté provést vhodné kroky k zabránění jejího vzniku, popřípadě omezení důsledků při vzniku poruchy.

Náhlé poruchy: Vznikají vlivem působení vnějších vlivů, které překračují konstrukční možnosti prvku, protože s nimi nebylo počítáno při konstrukčním návrhu. Poruchy tohoto typu vznikají náhle a čas od inicializace do projevení poruchy je velice krátký. Častými příčinami jsou materiálové či konstrukční vady. Většina náhlých poruch je dobře identifikovatelná, protože přímo souvisí se svým vznikem. K jejich identifikaci není nutné použít preventivní systém údržby, ale vždy je nutné provést pečlivou kontrolu vozidla.

Kombinované poruchy: Vznikají kombinací dvou předešlých typů poruch. Nejčastěji se vyskytují v kombinaci náhlé poruchy, která inicializuje většinou nějaký typ postupného poškození a tím vzniká postupná porucha.

Průběhy jednotlivých typů poruch jsou zobrazeny na obr. č. 3.2.



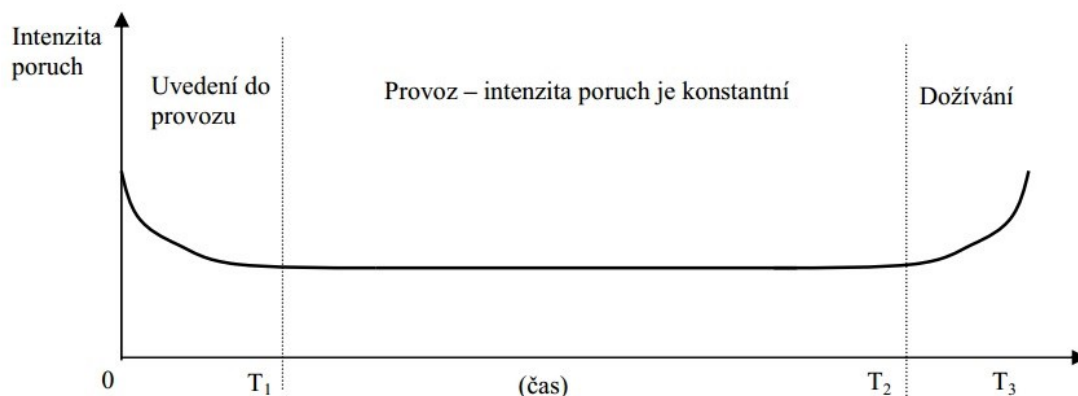
Obr. č. 3.2: Průběhy poruch: 1 - postupná, 2 - náhlá, 3 – kombinovaná [3]

Vanová křivka: Je neznámějším vyjádřením intenzity poruch v době funkčního života výrobku (viz obr. č. 3.3). Vanová křivka se skládá ze tří částí:

Doba záběhu – vyskytují se rané poruchy, jejichž intenzita s dobou provozu klesá. Jedná se o tzv. dětské nemoci, které vznikají již při konstrukci a výrobě. Tato fáze může až zcela vymizet, pokud se jedná o výrobky vyráběné hromadně či velkosériově.

Doba provozu – intenzita poruch se po předchozí fázi ustálí na konstantní hodnotě, využívá se vložená spolehlivost vozidla a poruchy vznikají z převážné většiny pouze působením náhodných vlivů. Tato fáze je nejdelší, a pokud je využíváno vhodného systému údržby, je zde možnost výrazných úspor a maximálního prodloužení této námi žádané fáze.

Doba dožívání – intenzita poruch roste, vlivem těchto poruch je převážně opotřebení, koroze, únava materiálu a vlivem těchto faktorů se neustále zvyšuje poruchovost výrobku, až dospěje do okamžiku, kdy se již daný výrobek nevyplatí udržovat. V tomto okamžiku je výrobek vyřazen a fyzicky zlikvidován.

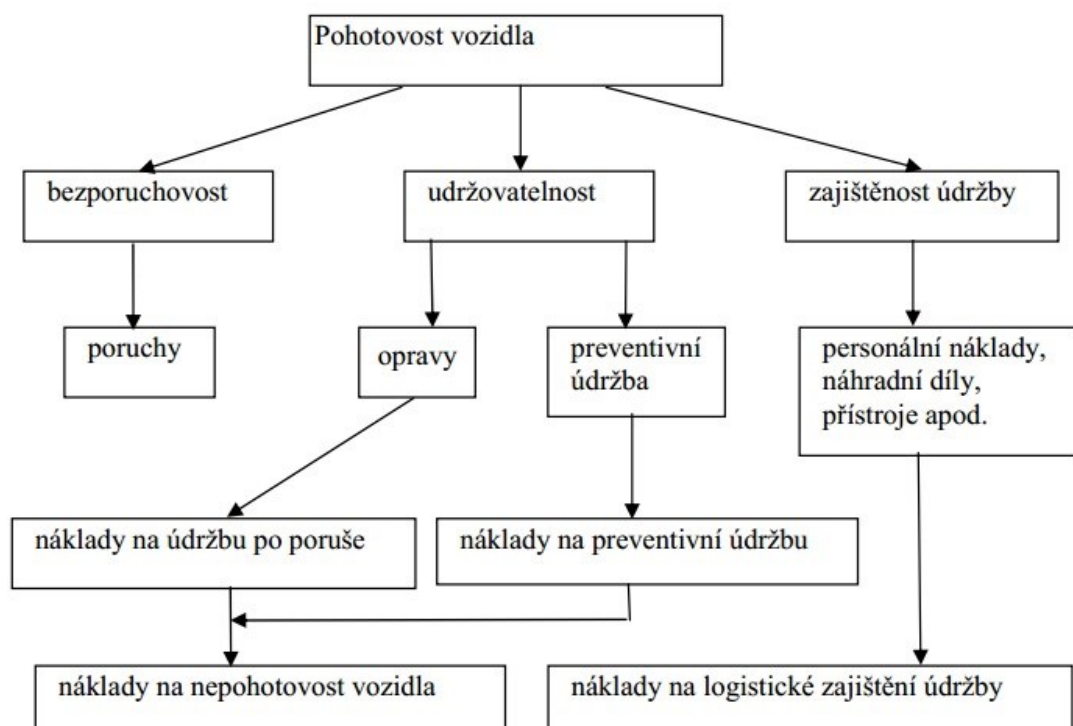


Obr. č. 3.3: Vanová křivka [3]

3.2 Náklady vznikající s požadovanou spolehlivostí výrobků

- Náklady na nepohotovost – vznikají ztrátou funkce vozidla zapříčiněné jeho poruchou.
- Záruční náklady – vznikají na základě smluvního ujednání, kdy dodavatel provádí servis vozidla. Tyto náklady se pak promítají do vyšší pořizovací ceny vozidla.
- Náklady z odpovědnosti za škodu způsobenou vadou vozidla – vznikají v důsledku velkých materiálních ztrát, poškození životního prostředí a v neposlední řadě i v důsledku zranění či usmrcení osob.

Pro lepší orientaci v nákladech v průběhu životního cyklu výrobku se vypočítávají náklady na životní cyklus výrobku tzv. LCC (schéma LCC zobrazuje obr. č. 3.4)



Obr. č. 3.4: Schéma nákladů na spolehlivost (LCC) [3]

4 Teoretický základ pro zpracování experimentálních dat

Pro zpracování naměřených dat je potřeba znát některé vybrané kapitoly z oblasti statistické matematiky a spolehlivostních výpočtů, proto v této kapitole nastíním s jakými pojmy, vzorci, typy rozdělení pravděpodobnosti a metodami budu pracovat v praktické části bakalářské práce.

4.1 Základní charakteristiky náhodných veličin

V této kapitole a jejich podkapitolách jsem využil rovnice a definice, jejichž zdrojem je doporučená literatura [2].

Běžně měřené veličiny, jako je například doba do poruchy, doba mezi poruchami nebo počet poruch, nabývají různých hodnot v určitém intervalu (vymezeném časovém úseku, počtu vykonaných otáček, počet najetých kilometrů apod.) s určitou pravděpodobností. Tyto veličiny jsou tak náhodnou veličinou, která může nabývat libovolných hodnot v daném intervalu, nebo pouze některých hodnot. Proto náhodné veličiny rozlišujeme na:

- Spojitou náhodnou veličinu
- Diskrétní náhodnou veličinu

Zákonitost přiřazující hodnotám daném náhodné veličiny jejich pravděpodobnosti se označuje jako rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny.

Každé rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny má své charakteristické veličiny, které dané rozdělení pravděpodobnosti popisují. Tyto charakteristiky jsou například:

- Distribuční funkce
- Doplněk k distribuční funkci
- Hustota pravděpodobnosti
- Pravděpodobnostní funkce
- Intenzita náhodné veličiny
- Střední hodnota

- Rozptyl
- Kvantily, decily, percentily a další

4.1.1 Spojitá náhodná veličina

Pro spojitou náhodnou veličinu jsou důležité tyto charakteristiky:

Distribuční funkce náhodné veličiny, která je definována jako pravděpodobnost, že náhodná veličina T nabude hodnoty menší nebo rovné hodnotě t . Z této definice získáváme vztah pro distribuční funkci:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (4.1)$$

Doplněk k distribuční funkci $R(t)$ naopak udává pravděpodobnost, že náhodná veličina T nabude hodnoty vyšší než t . Lze ji vyjádřit jako:

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (4.2)$$

Pro distribuční funkci a její doplněk vždy ve stejné hodnotě platí:

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (4.3)$$

Hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny $f(t)$ vyjadřuje pravděpodobnost, že náhodná veličina T nabude hodnoty z nekonečně malého intervalu dt . Hustotu pravděpodobnosti můžeme napsat jako:

$$f(t)dt = P(t \leq T \leq t + dt) \quad (4.4)$$

Pokud existuje derivace distribuční funkce, můžeme hustotu pravděpodobnosti náhodné veličiny vyjádřit vztahem:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Intenzita náhodné veličiny $\lambda(t)$ představuje podmíněnou pravděpodobnost toho, že jev nastane během nekonečně malého intervalu dt při podmínce, že do okamžiku t jev ještě nenastal. Tuto intenzitu náhodné veličiny lze vyjádřit vztahem:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.6)$$

4.1.2 Diskrétní náhodná veličina

Pro diskrétní náhodnou veličinu jsou určující tyto charakteristiky:

Distribuční funkce diskrétní náhodné veličiny, kterou lze vyjádřit vzorcem:

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} p(x_i) \quad (4.7)$$

4.1.3 Charakteristiky pro oba typy náhodných veličin

Vlastnosti náhodné veličiny lze popsat číselnými charakteristikami, které nám určují polohy důležitých bodů pro danou náhodnou veličinu. Jedná se především o střední hodnotu, rozptyl a směrodatnou odchylku.

Střední hodnota: Je to základní charakteristika polohy pro náhodnou veličinu. Vyjadřuje hodnotu, kolem které se hodnoty náhodné veličiny při opakování pokusů vyskytují. Pro spojitou náhodnou veličinu se určí:

$$E(T) = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (4.8)$$

Kde t je hodnota náhodné veličiny T a $f(t)$ je hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny.

Pro diskrétní náhodnou veličinu se pak střední hodnota určí jako:

$$E(X) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p(x_i) \quad (4.9)$$

Kde x_i jsou hodnoty náhodné veličiny pro $i \in \{1; n\}$ a $p(x_i)$ jsou hodnoty pravděpodobnostní funkce náhodné veličiny.

Rozptyl: Představuje míru rozptýlení (variability) naměřených hodnot kolem střední hodnoty. Pro spojitou náhodnou veličinu se určí:

$$D(T) = \int_{-\infty}^{\infty} [t - E(T)]^2 \cdot f(t) dt \quad (4.10)$$

Kde f je hustota náhodné veličiny T a $f(t)$ je hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny.

Pro diskrétní náhodnou veličinu se pak rozptyl určí jako:

$$D(X) = \sum_{i=1}^n [x_i - E(X)]^2 \cdot p(x_i) \quad (4.11)$$

Kde x_i jsou hodnoty náhodné veličiny pro $i \in \langle 1; n \rangle$ a $p(x_i)$ jsou hodnoty pravděpodobnostní funkce náhodné veličiny.

Směrodatná odchylka: Směrodatná odchylka je definována jako odmocnina z rozptylu:

$$\sigma(T) = \sqrt{D(T)} \quad (4.12)$$

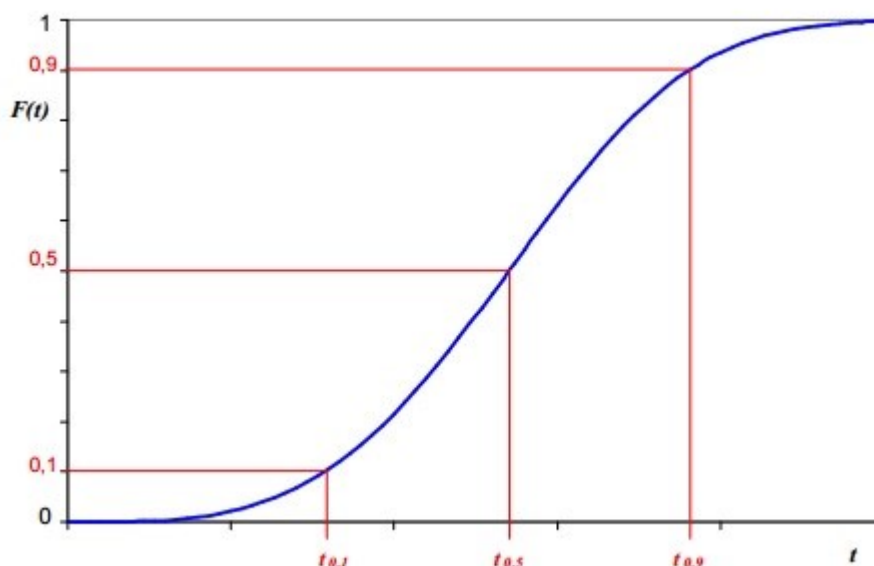
Kvantily: Jedná se o určité hodnoty náhodné veličiny, které odpovídají předem stanovené hodnotě distribuční funkce (viz obr. č. 4.1). Kvantily dále rozlišujeme na:

- Kvartily – rozdělují distribuční funkci na 4 úseky po 25 procentech pravděpodobnosti.
- Decily – rozdělují distribuční funkci na 10 úseků po 10 procentech pravděpodobnosti.
- Percentily – rozdělují distribuční funkci na 100 úseků po 1 procentu pravděpodobnosti.

Důležitým kvantilem je také $t_{0,5}$ kvantil, který rozděljuje obor náhodné veličiny na dvě shodně pravděpodobné poloviny. Tento kvantil je označován jako medián.

Kvantily lze obecně vypočítat jako:

$$F(t_p) = P(T \leq t_p) = p \quad (4.13)$$



Obr. č. 4.1: Kvantily spojité náhodné veličiny [2]

4.2 Vybrané typy rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny

V této kapitole a jejích podkapitolách jsem využil rovnice a definice, jejichž zdrojem je doporučená literatura [2].

Jelikož poruchy mohou vznikat v libovolné době (nebo ujeté vzdálenosti) od počátku měření, představují tak hodnoty spojitou náhodnou veličinu. Tyto naměřené hodnoty se řídí jedním z rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny, které je popisováno tvarem distribuční funkce, případně hustoty pravděpodobnosti.

4.2.1 Exponenciální rozdělení

Toto rozdělení se využívá, pokud potřebujeme popsat dobu do vzniku náhodného jevu v Poissonově procesu. U tohoto rozdělení je charakteristické, že intenzita výskytu jevu je konstantní ($\lambda = \text{konst.}$), která je zároveň parametrem tohoto rozdělení. Exponenciální rozdělení se využívá pro popis spolehlivosti zařízení, u kterých se poruchy vyskytují náhodně, náhle a bez předchozího opotřebení, jako je například elektronika. Toto rozdělení lze též označovat jako $\text{Ex}(\lambda)$. Průběhy pravděpodobnostní funkce a distribuční funkce zobrazuje obr. č. 4.2.

Hustotu pravděpodobnosti pro exponenciální rozdělení pravděpodobnosti můžeme popsat vztahem:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.14)$$

Kde t je hodnota náhodné veličiny T [h] a λ je intenzita poruch [h^{-1}]

Distribuční funkce exponenciálního rozdělení má pak tvar:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.15)$$

Doplňk k distribuční funkci, tedy pravděpodobnost bezporuchového stavu, lze vypočítat jako:

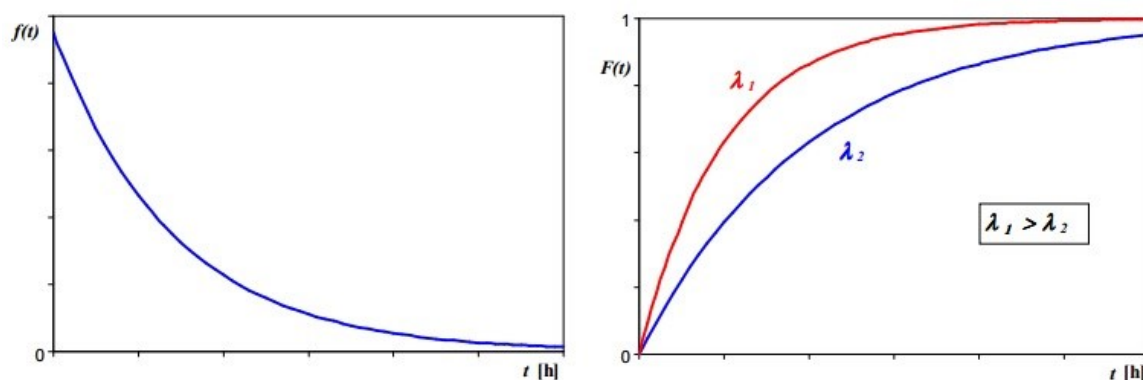
$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.16)$$

Pro střední hodnotu platí:

$$E(T) = \frac{1}{\lambda} \quad (4.17)$$

A pro rozptyl platí:

$$D(T) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (4.18)$$



Obr. č. 4.2: Hustota pravděpodobnosti (vlevo) a distribuční funkce (vpravo) exponenciálního rozdělení [2]

4.2.2 Normální rozdělení

Normální rozdělení je nejrozšířeněji používaným rozdělením pravděpodobnosti. Popisuje náhodné veličiny, na které působí větší množství faktorů, ale žádný z nich není značně dominantní nad ostatními. Hodnoty tohoto způsobu rozdělení se soustřeďují kolem střední hodnoty a spolu se vzdáleností hodnot od této střední hodnoty pravděpodobnost jejich výskytu klesá. Z toho vyplývá, že střední hodnota u normálního rozdělení má vždy nejvyšší pravděpodobnost výskytu v měření. Normální rozdělení je popsáno dvěma parametry. Jedním z nich je právě střední hodnota (μ) a druhým je rozptyl (σ^2). Normální rozdělení lze značit jako $N(\mu; \sigma^2)$. Průběh hustoty pravděpodobnosti má tvar Gaussovy křivky, která je popsána vztahem (graficky znázorněna na obr. č. 4.3):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.19)$$

Kde t je hodnota náhodné veličiny $T[h]$, $\mu [h]$ je střední hodnota a $\sigma [h]$ je směrodatná odchylka.

Normální rozdělení má jednu velice důležitou vlastnost, která se nazývá pravidlo tři sigma. To říká, že naprostá většina hodnot (99,73%) leží v intervalu $(\mu \pm 3\sigma)$:

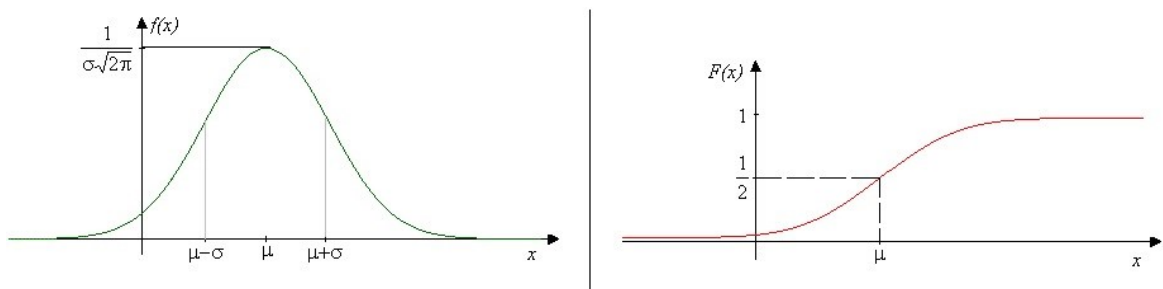
$$P(\mu - 3\sigma < T < \mu + 3\sigma) = 0,9973 \quad (4.20)$$

Podobně lze vypočítat počet hodnot v rozmezích $\pm 2\sigma$ a $\pm \sigma$:

$$P(\mu - 2\sigma < T < \mu + 2\sigma) = 0,9545 \quad (4.21)$$

$$P(\mu - \sigma < T < \mu + \sigma) = 0,6827 \quad (4.22)$$

Z důvodu složitého výpočtu jednotlivých charakteristik normálního rozdělení se často provádí transformace na normované normální rozdělení, které se vyznačuje parametry $\mu=0$ a $\sigma^2=1$.



Obr. č. 4.3: Hustota pravděpodobnosti s vyznačenou oblastí $\pm\sigma$ (vlevo) a distribuční funkce (vpravo) [4]

4.2.3 Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení je velice často používané pro spolehlivostní výpočty z důvodu jeho vysoké variability, neboť správnou změnou jeho parametrů lze velice dobře nahrazovat i jiná rozdělení pravděpodobnosti.

Distribuční funkce Weibullova rozdělení je předepsána vztahem (graficky viz obr. č. 4.4):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-c}{t_0}\right)^m} \quad (4.23)$$

Kde t je hodnota náhodné veličiny T [h], m [-] je parametr tvaru, t_0 [h] je parametr měřítka a c [h] je parametr polohy.

Pokud parametr polohy je roven nule, pak se toto rozdělení označuje jako Weibullovo dvouparametrické rozdělení pravděpodobnosti (W2P). Distribuční funkce se pak zjednoduší do tvaru:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.24)$$

Doplňek k distribuční funkci pak udává pravděpodobnosti bezporuchového stavu:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.25)$$

Pro hustotu pravděpodobnosti W2P pak platí následující vztah (graficky viz obr. č. 4.4)

$$f(t) = \frac{m}{t_0} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.26)$$

Intenzita poruch je závislý parametr, který se odvíjí od hodnoty parametru m . Změnou tohoto parametru lze simulovat intenzitu v různých fázích životního cyklu výrobku. Tuto závislost lze vyjádřit vztahem:

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{m-1} \quad (4.27)$$

Dalšími důležitými charakteristikami je střední hodnota a rozptyl:

$$T_s = t_0 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (4.28)$$

$$D(T) = t_0 \cdot \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right] \quad (4.29)$$

Kde $\Gamma(n)$ je tzv. Gamma funkce a je definována vztahem:

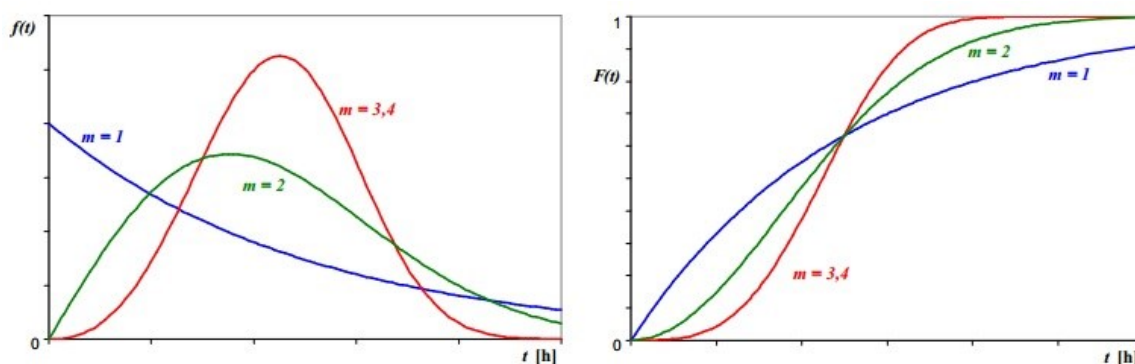
$$\Gamma(n) = \int_0^{+\infty} e^{-x} \cdot x^{n-1} dx \quad (4.30)$$

Weibullovo rozdělení má tu vlastnost, že pokud parametr m má určitou hodnotu, Weibullovo rozdělení přechází v jiný druh rozdělení. Pokud:

$m = 1$, pak přechází v exponenciální rozdělení,

$m = 2$, pak přechází v Rayleighovo rozdělení,

$m = 3,4$ pak aproximuje normální rozdělení.



Obr. č. 4.4: Hustota pravděpodobnosti (vlevo) a distribuční funkce (vpravo) pro W2P s různými hodnotami parametru m [2]

4.3 Odhady parametrů Weibullova rozdělení lineární regresí

Z důvodu velké variabilnosti Weibullova rozdělení je toto rozdělení vhodné jako výchozí volba pro odhad tvaru rozdělení náhodné veličiny. Z rovnice distribuční funkce pro Weibullovo rozdělení lze odvodit substituci pro rovnici lineární regrese a tím je pak možné přiřadit jednotlivým členům rovnice přímky lineární regrese parametry Weibullova rozdělení.

Z distribuční funkce pro dvouparametrické Weibullovo rozdělení tedy odvodíme rovnici pro výpočet lineární regrese:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.31)$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (4.32)$$

$$\ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{t_0}\right)^m \quad (4.33)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)^m \quad (4.34)$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = m \cdot \ln(t) - m \cdot \ln(t_0) \quad (4.35)$$

Tato rovnice již částečně připomíná rovnici přímky a můžeme tedy provést substituci do tvaru:

$$Y = k \cdot x + q \quad (4.36)$$

Přičemž jednotlivé členy jsou nahrazeny takto:

$$Y = \ln(-\ln(1 - F(t))) \quad (4.37)$$

$$k \cdot x = m \cdot \ln(t) \quad (4.38)$$

$$q = m \cdot \ln(t_0) \quad (4.39)$$

Z poslední rovnice si ještě vyjádříme člen t_0 :

$$t_0 = e^{-\frac{q}{m}} \quad (4.40)$$

Dále pro výpočet bude potřeba odhad hodnoty distribuční funkce:

$$F(t) = \frac{n_i - 0,3}{N + 0,4} \quad (4.41)$$

Kde n_i je odhad mediánového pořadí a N je celkový počet poruch celku.

Z takto získaných dat lze sestavit bodový graf XY, kde zobrazíme závislost:

$$Y = f(\ln(t)) \quad (4.42)$$

Protože celá analýza je provedena pomocí počítačového programu Microsoft Excel 2013, regresní přímka a hodnota spolehlivosti této přímky je vykreslena automaticky. Poté z této rovnice přímky jsou odečteny parametry Weibullova rozdělení.

4.4 Test dobré shody Kolmogorov-Smirnov

Testy dobré shody se používají k testování matematické hypotézy, jejíž obsahem je zkoumání tvaru rozdělení náhodné veličiny. Vedle známého testu dobré shody χ^2 , který se používá pro odhady parametrů rozdělení, pokud máme větší množství naměřených hodnot, existuje ještě další test dobré shody, jehož autory jsou Andrej Nikolajevič Kolmogorov a Vladimir Ivanovič Smirnov. Test dobré shody Kolmogorov-Smirnov lze na rozdíl od χ^2 použít i na výběry o velmi nízkých četnostech (minimum je pět statistických záznamů), které lze předpokládat u jednotlivých konstrukčních celků nového typu vozidla.

Pro potřeby bakalářské práce bude potřeba pouze test pro jeden výběr, jelikož nebudu porovnávat závislost spolehlivosti jednotlivých prvků.

Pro test jednoho výběru nejprve určíme nulovou hypotézu a k ní opačnou (alternativní) hypotézu. Často se používají hypotézy ve tvaru:

Nulová hypotéza H_0 je, že rozdělení náhodné veličiny je dáno distribuční funkcí $F_0(x)$. Opačná hypotéza k ní je pak H_1 , že rozdělení náhodné veličiny není dáno distribuční funkcí $F_0(x)$.

Postup při testování náhodné veličiny je následující [4]:

- 1) Určí se distribuční funkce rozdělení výběru náhodné veličiny z naměřených dat. Tento krok lze provést dle vzorce 4.41. V praktické části je tato veličina označena jako $F_T(\Delta L)$ kvůli rozlišení od odhadované distribuční funkce W_{2P} .
- 2) Je vypočtena distribuční funkce teoretického W_{2P} rozdělení $F_{W_{2P}}(\Delta L)$.
- 3) Určení nulové hypotézy H_0 : Distribuční funkce rozdělení náhodné veličiny výběru odpovídá vypočtenému W_{2P} rozdělení.
- 4) Je vypočteno testovací kritérium podle vzorce:

$$D_1 = \sup |F_T - F_{W_{2P}}| \quad (4.43)$$

Kde D_1 je testovací kritérium, F_T jsou hodnoty distribuční funkce výběrového rozdělení pravděpodobnosti a $F_{W_{2P}}$ jsou hodnoty distribuční funkce teoretického W_{2P} .

- 5) Z tabulky (viz příloha A) se určí kritická hodnota $D_{1\max,p}$ (kde p je hladina významnosti) pro testovací kritérium podle počtu prvků testovaného výběru.

6) Porovná se testovací kritérium s jeho kritickou hodnotou:

$$D_1 < D_{1max,p} \tag{4.44}$$

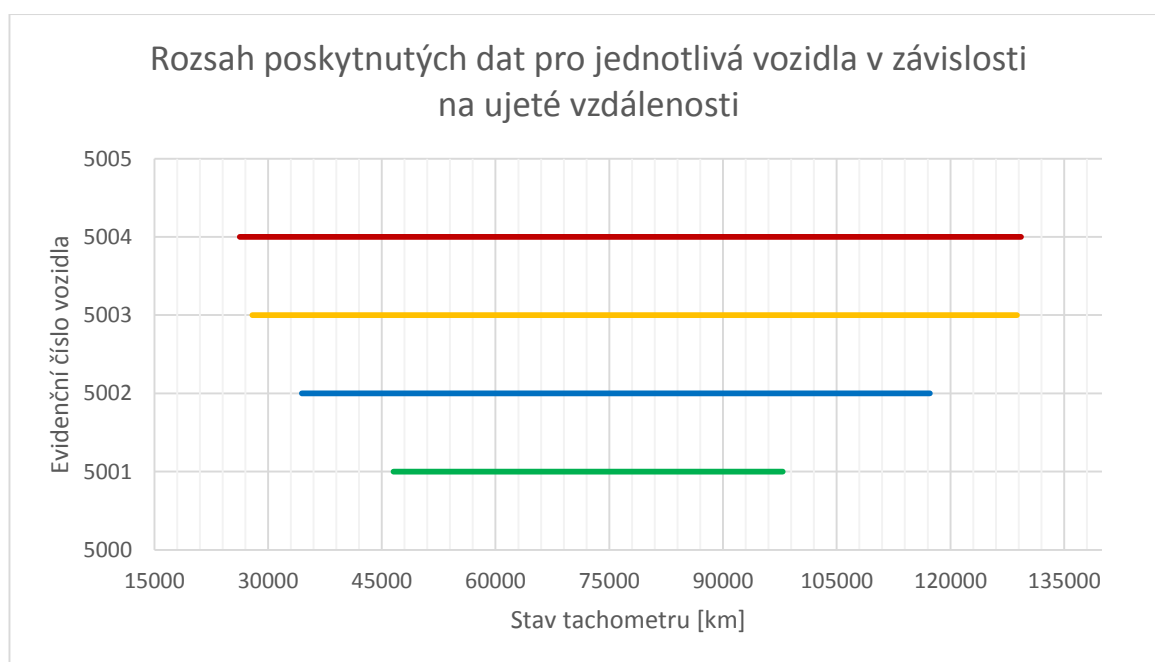
Pokud tato nerovnost platí, pak přijímáme hypotézu H_0 .

5 Posouzení provozní spolehlivosti

Provozní spolehlivost elektrobusu je posuzována za období 2012 až 2013, za která byla poskytnuta data ze strany Dopravního podniku Ostrava a.s. Tato data byla získána ve formě jednotlivých výpisů z databáze elektrobusů. Takto získané výpisy obsahují údaje o veškerých aktivitách prováděných na všech čtyřech elektrobusích (evidenční čísla 5001 až 5004), které dopravní podnik provozuje (viz tabulka č. 5.1). Rozsah získaných dat je znázorněn na obr. č. 5.1. Veškerá poskytnutá data jsou kvůli značné rozsáhlosti přiložena na multimediálním nosiči.

Tabulka č. 5.1: Ukázka ze souboru dat pro elektrobus ev. č. 5002. [DPO]

Číslo zakázky	Název zakázky	Typ PP	Umístění	Hodiny	Typ hodnoty	Předvídatelnost	Datum (2012)	Název kroku
Z000176	Oprava a údržba majetku	16	5002	0	KNIO	PL	31.12.	VÝJEZDY TECHNOLOGICKÝCH VOZIDEL
Z000176	Oprava a údržba majetku	16	5002	0	KNIO	PL	31.12.	3120FDUCNI
Z000020	Pneumatiky - MHD Autobusy	A0	5002	0	KNIO	PL	31.12.	3120FDPNEU
Z000176	Oprava a údržba majetku	16	5002	1,5	KNIP	NP	27.12.	KOUŘÍ PŘEDEHRÍVAČ



Obr. č. 5.1: Rozsah dat v korespondenci s ujetými kilometry [Autor]

Přestože jsou tato vozidla stejného typu, první z této čtveřice (ev.č. 5001) je prototyp, zbylá tři vozidla (ev. č. 5002, 5003 a 5004) jsou vyrobena jako kusová výroba. Proto se bakalářská práce bude zabývat porovnáním spolehlivosti tohoto prototypu a kusové výroby.

5.1 Získání potřebných údajů pro výpočet spolehlivosti

Veškeré poskytnuté údaje byly poskytnuty ve složení:

- Dva soubory o operacích prováděných na elektrobusech pro každý elektrobuse (rok 2012 a rok 2013).
- Jeden soubor pro každý elektrobuse se záznamy celkové ujeté vzdálenosti.

Data poskytnutá dopravním podnikem obsahovala veškeré operace prováděné na elektrobusech, proto bylo potřeba tato data vytřídit. Z dat byly odstraněny záznamy o pravidelných kontrolách prováděných na informačním systému, odbavovacím systému a pneumatikách a dalších částech vozidla. Dále byly z dat odebrány záznamy o nepředvídatelných opravách, jako jsou dopravní nehody a vandalismus. Poté byly zbylé poruchy rozděleny do skupin, ve kterých budou dále posuzovány (obr. č. 5.2).



Obr. č. 5.2: Rozdělení získaných dat do skupin [Autor]

Následně byly sloučeny násobné záznamy, které popisovaly zásah v jedné skupině ve shodné době odstávky, pod jednu poruchu, jelikož nebylo možné dále rozlišit, čeho se oprava konkrétně týkala. Takto rozděleným poruchám byl přidělen kilometrický nájezd vozidla v době vzniku poruchy a byla vypočtena ujetá vzdálenost do poruchy po každý konkrétní případ dle následujícího vzorce:

$$\Delta L = L_{i+1} - L_i \quad (5.1)$$

Kde ΔL [km] je ujetá vzdálenost do poruchy, L_{i+1} [km] je celková ujetá vzdálenost při vzniku $i+1$ poruchy a L_i [km] je celková ujetá vzdálenost při vzniku i -té poruchy.

Takto upravená data mají následující podobu (viz tabulka č. 5.2):

Tabulka č. 5.2: Doba do poruchy u elektrobusu ev .č. 5002 ve skupině Dveře. [Autor]

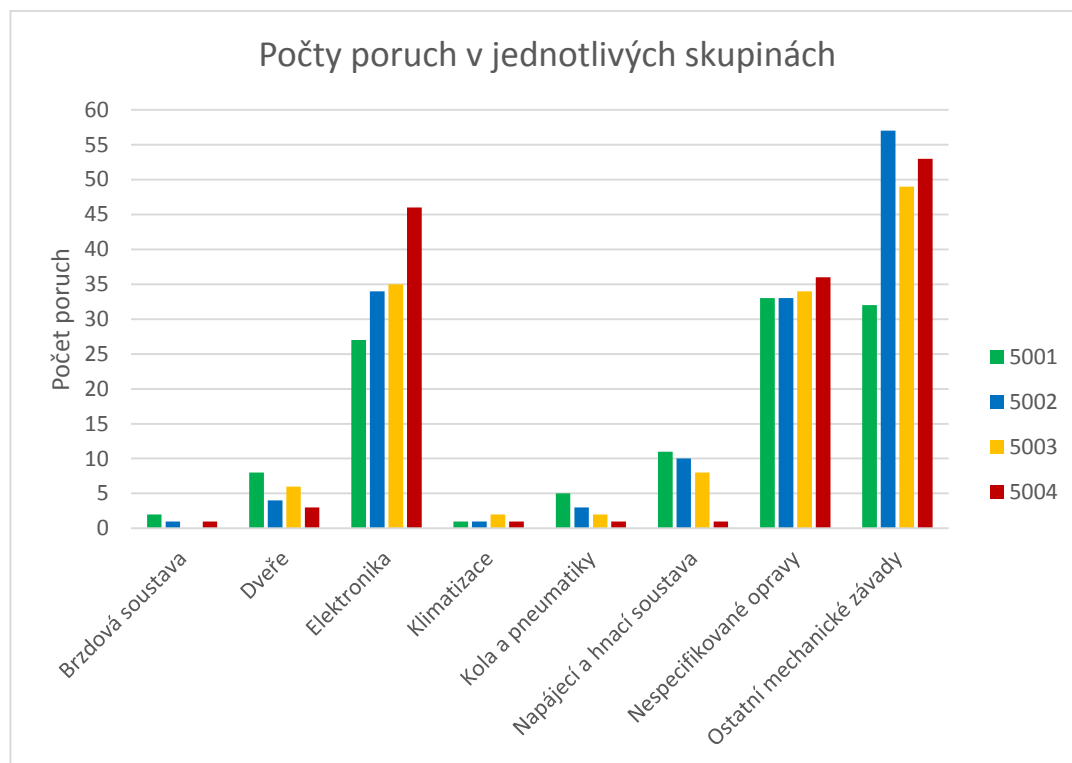
Datum	ODO [km]	ΔL [km]
29.3.2012	43929	
11.5.2012	49305	5376
21.7.2012	56787	7482
12.9.2012	61723	4937
23.10.2012	66069	4346

Po takovémto výpočtu byly odhaleny chyby v poskytnutých datech, které byly pravděpodobně způsobeny lidským faktorem při vnitropodnikových operacích s daty. Jednalo se o chyby vyznačující se zápornou ujetou vzdáleností mezi dvěma poruchami. Tyto chyby se vyskytovaly zřídka, a proto byly pro potřebné výpočty opraveny formou zprůměrování dvou nejbližších záznamů o kilometrickém nájezdu vozidla.

Posledním krokem v úpravě dat je seřazení ujetých vzdáleností do poruchy podle velikosti vzestupně a přiřazení pořadového čísla každé hodnotě. Takto upravená data byla naformátována do tabulek, přičemž každému vozidlu byla pro přehlednost přiřazena jiná barva:

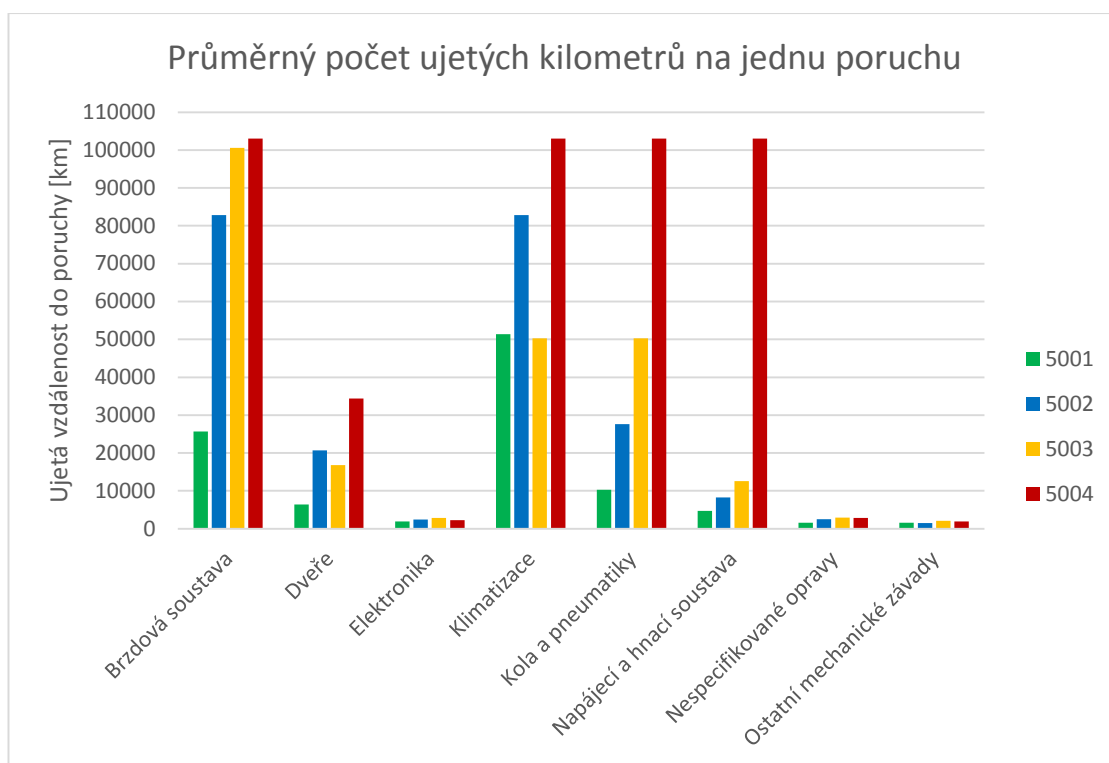
- 5001 – zelená
- 5002 – modrá
- 5003 – tmavě žlutá
- 5004 – červená cihlová
- Celkové a souhrnné hodnoty – fialová

Po této úpravě byly zjištěny četnosti poruch na jednotlivých skupinách elektrobusů. Tyto četnosti jsou zobrazeny na obr. č. 5.3:



Obr. č. 5.3: Histogram poruch [Autor]

Jelikož elektrobusy mají různý počet najetých kilometrů za zkoumané období, je vhodné vztáhnout počet ujetých kilometrů na jednu poruchu (viz obr. č. 5.4).



Obr. č. 5.4: Histogram ujetých kilometrů na 1 poruchu [Autor]

5.2 Výpočet parametrů W2P lineární regresí

Vzhledem k značné rozsáhlosti výpočtů, které obsahují 16 výpočtově shodných linií, budu zde uvádět pouze výpočet u skupiny poruch, týkajících se dveří, pro elektrobusy kusové výroby (5002 až 5004). Jelikož jsou tyto elektrobusy téměř identické, je možné seskupit poruchy a vytvořit tak jeden výpočtový celek. Výpočty pro elektrobus ev. č. 5001 a ostatních skupin elektrobusů kusové výroby jsou pro svou rozsáhlost přiloženy jako speciální multimediální příloha. Grafické zpracování těchto skupin a krátké tabelární shrnutí výsledků je uvedeno v přílohách B až N.

Následující vzorce a výpočty budou prováděny pro první hodnotu doby do poruchy. Výpočty pro ostatní hodnoty jsou provedeny dle shodného vzorce s dosazením příslušných hodnot a pro první tři hodnoty jsou výsledky uvedeny vždy pod vzorovým výpočtem tabulka č. 5.3 až tabulka č. 5.5 a tabulka č. 5.8 až tabulka č. 5.11).

Nejprve určíme předpokládanou hodnotu distribuční funkce Weibullova rozdělení pomocí vzorce 4.41, přičemž celkový počet poruch dosáhl hodnoty 13:

$$F_i T(\Delta L) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} = \frac{1 - 0,3}{13 + 0,4} = 0,05 \quad (5.2)$$

Tabulka č. 5.3: První tři výpočty distribuční funkce výběrového rozdělení pravděpodobnosti. [Autor]

Pořadové číslo poruchy i	ΔL [km]	$F_{iT}(\Delta L)$
1	326	0,05
2	573	0,13
3	1208	0,20

Následně je potřeba provést výpočty, které povedou k substituci uvedené v rovnicích 4.35 a 4.36. Proto nejprve provedeme výpočet přirozeného logaritmu ujeté vzdálenosti do poruchy:

$$\ln(\Delta L) = \ln(326) = 5,786649 \quad (5.3)$$

Tabulka č. 5.4: Výpočet přirozeného logaritmu [Autor]

Pořadové číslo poruchy i	ΔL [km]	$F_{iT}(\Delta L)$	$\ln(\Delta L)$
1	326	0,05	5,786648884
2	573	0,13	6,351416117
3	1208	0,20	7,096710617

Poté je vypočtena hodnota Y, která reprezentuje hodnoty na svislé ose substituční přímky:

$$Y = \ln(-\ln(1 - F_i T(\Delta L))) = \ln(-\ln(1 - 0,05))$$

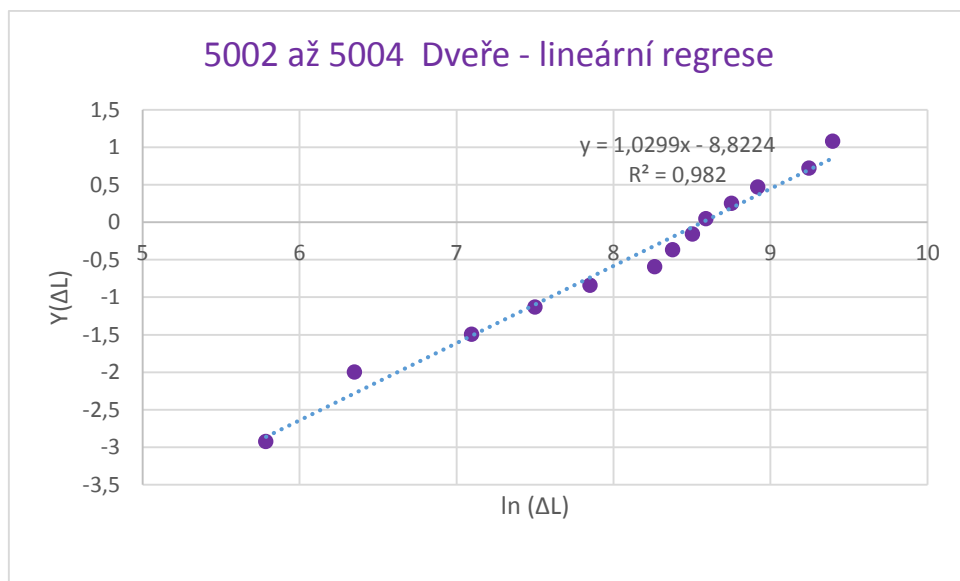
$$Y = -2,92522 \quad (5.4)$$

Tabulka č. 5.5: Výpočet hodnoty Y [Autor]

Pořadové číslo poruchy i	ΔL [km]	$F_{iT}(\Delta L)$	$\ln(\Delta L)$	$Y = \ln(-\ln(1 - F(\Delta L)))$
1	326	0,05	5,786648884	-2,925223234
2	573	0,13	6,351416117	-1,99756029
3	1208	0,20	7,096710617	-1,491606142

Následně je z těchto hodnot vytvořen XY bodový graf, kdy na ose x jsou vyneseny hodnoty přirozeného logaritmu ujeté vzdálenosti do poruchy a na ose y jsou vyneseny hodnoty Y. V tomto grafu je zobrazena spojnice trendu, automaticky vypočtená rovnice této

regresní přímky a také hodnota spolehlivosti (druhá mocnina indexu korelace). Vzor takového grafu je zobrazen na obr. č. 5.5:



Obr. č. 5.5: Graf lineární regrese [Autor]

Z rovnice regresní přímky lze přímo odečíst následující hodnoty (viz tabulka č. 5.6):

- Parametr tvaru Weibullova rozdělení pravděpodobnosti m . Tento parametr je roven koeficientu u proměnné x .
- Hodnotu $-q$, ze které je níže proveden výpočet parametru měřítka $W2P$.

Tabulka č. 5.6: Tabelární přehled hodnot po lineární regresi [Autor]

N	13
m	1,0299
-q	8,8224
R ²	0,982

Parametr měřítka pak je určen jako:

$$t_0 = e^{\frac{-q}{m}} = e^{\frac{8,8224}{1,0299}} = 5251,498 \text{ km} \quad (5.5)$$

Aby byly potřebné parametry a charakteristiky kompletní, je zapotřebí ještě vypočítat střední ujetou vzdálenost do poruchy dle vzorce 4.28:

$$T_s = t_0 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) = 5251,498 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1,0299}\right) \quad (5.6)$$

$$T_s = 5188,852 \text{ km}$$

Výsledné hodnoty pak zobrazuje tabulka č. 5.7:

Tabulka č. 5.7: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	13
m	1,0299
-q	8,8224
R ²	0,982
t _o	5251,498
T _s	5188,852

Z těchto parametrů pak lze sestavit rovnici pro hustotu pravděpodobnosti a distribuční funkci Weibullova rozdělení pravděpodobnosti poruch dveří v kusově vyrobených vozech (pro vzorce v obecném vyjádření viz rovnice 4.26 a 4.31):

$$f_{W2P}(\Delta L) = \frac{1,0299}{5251,498} \cdot \left(\frac{\Delta L}{5251,498} \right)^{1,0299-1} \cdot e^{-\left(\frac{\Delta L}{5251,498} \right)^{1,0299}} \quad (5.7)$$

$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{5251,498} \right)^{1,0299}} \quad (5.8)$$

5.3 Vlastní výpočet spolehlivosti

Nyní je již známá rovnice pro výpočet konkrétního W2P teoretického rozdělení pravděpodobnosti a je možné vypočítat hodnoty funkce hustoty pravděpodobnosti pro jednotlivé vzdálenosti do poruchy. Získáme je dosazením do rovnice 5.7:

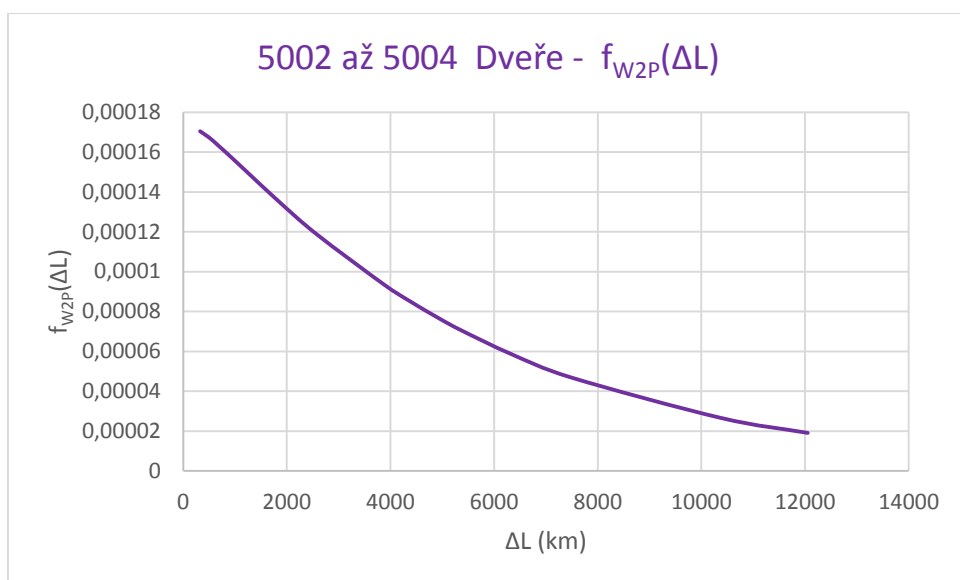
$$f_{W2P}(326) = \frac{1,0299}{5251,498} \cdot \left(\frac{326}{5251,498} \right)^{1,0299-1} \cdot e^{-\left(\frac{326}{5251,498} \right)^{1,0299}} \quad (5.9)$$

$$f_{W2P}(326) = 1,70457 \cdot 10^{-3}$$

Tabulka č. 5.8: Výpočet hustoty pravděpodobnosti [Autor]

Pořadové číslo poruchy i	ΔL [km]	$f_{iW2P}(\Delta L)$
1	326	0,000170457
2	573	0,000165721
3	1208	0,0001506

Takto vypočtené hodnoty lze pro lepší názornost zobrazit v XY bodovém grafu s vyhlazenou spojnici (obr. č. 5.6)



Obr. č. 5.6: Graf hustoty pravděpodobnosti pro skupinu Dveře kusové výroby [Autor]

Dále je také možné vypočítat hodnotu distribuční funkce W2P pro každou ujetou vzdálenost do poruchy (ze vztahu 5.8):

$$F_{W2P}(326) = 1 - e^{-\left(\frac{326}{5251,498}\right)^{1,0299}} = 0,055348 \quad (5.10)$$

Tabulka č. 5.9: Výpočet distribuční funkce W2P [Autor]

Pořadové číslo poruchy i	ΔL [km]	$f_{iW2P}(\Delta L)$	$F_{iW2P}(\Delta L)$
1	326	0,000170457	0,055347686
2	573	0,000165721	0,096846167
3	1208	0,0001506	0,197053281

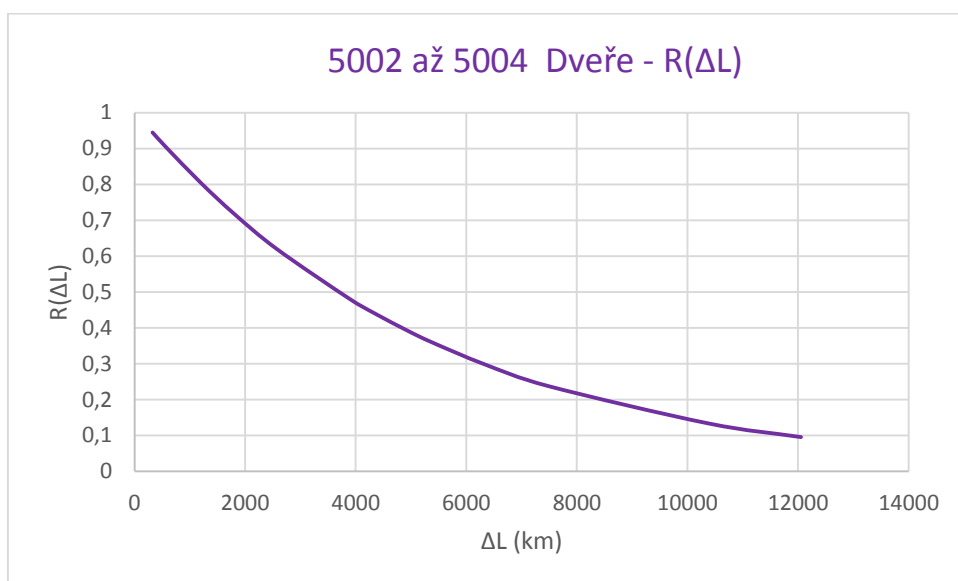
Provozní spolehlivost je velice důležitým parametrem při provozování vozidel a určuje pravděpodobnost bezporuchového stavu vozidla. Tuto provozní spolehlivost lze vypočítat ze vztahu 4.3:

$$R(326) = 1 - F_{W2P}(326) = 1 - 0,055348 = 0,944652 \quad (5.11)$$

Tabulka č. 5.10: Výpočet provozní spolehlivosti [Autor]

Pořadové číslo poruchy i	ΔL [km]	$f_{iW2P}(\Delta L)$	$F_{iW2P}(\Delta L)$	$R(\Delta L)$
1	326	0,000170457	0,055347686	0,944652314
2	573	0,000165721	0,096846167	0,903153833
3	1208	0,0001506	0,197053281	0,802946719

Průběh provozní spolehlivosti v závislosti ujeté vzdálenosti je znázorněn na obr. č. 5.7:



Obr. č. 5.7: Graf provozní spolehlivosti pro skupinu Dveře kusové výroby [Autor]

5.4 Test dobré shody Kolmogorov-Smirnov

Tento test byl rovněž proveden pro všechny výpočtové skupiny a jeho nulová hypotéza říká, že lze výběrové rozdělení pravděpodobnosti nahradit vypočteným W2P rozdělením s příslušnými parametry. V předchozích výpočtech byly vypočteny jak hodnoty distribuční funkce výběrového rozdělení pravděpodobnosti, tak i hodnoty distribuční funkce teoretického rozdělení pravděpodobnosti W2P s příslušnými parametry. Proto lze pokračovat ve výpočtu z rovnice 4.43, kdy je nejprve vypočtena hodnota rozdílu hodnot distribučních funkcí:

$$\begin{aligned}\Delta F_i(326) &= |F_T - F_{W2P}| = |0,052238 - 0,0553478| \\ \Delta F_i(326) &= 0,003109\end{aligned}\tag{5.12}$$

Tabulka č. 5.11: Výpočet rozdílů distribučních funkcí [Autor]

Pořadové číslo poruchy i	ΔL [km]	$F_{iT}(\Delta L)$	$F_{iW2P}(\Delta L)$	$ \Delta F_i $
1	326	0,0522388	0,055347686	0,00310888
2	573	0,1268657	0,096846167	0,030019505
3	1208	0,2014925	0,197053281	0,004439256

Následně je nalezeno maximum v takto uspořádaném výběru (supremum), které představuje testovací kritérium D_1 . Pro náš konkrétní případ bylo toto supremum nalezeno jako:

$$D_1 = \sup(|F_T - F_{W2P}|) = 0,092554 \quad (5.13)$$

Nakonec je testovací kritérium porovnáno s kritickou hodnotou, která je uvedena v tabulce v příloze A. Jelikož je tento test prováděn na hladině významnosti $p = 0,05$ a počet prvků této soustavy činí $N = 13$, pak je kritická hodnota pro tento test rovna $D_{1\max} = 0,361$.

Aby byla přijata testovaná hypotéza, že teoretické rozdělení W2P odpovídá rozdělení pravděpodobnosti výběru, je nutné, aby byla splněna podmínka uvedená v rovnici 4.43:

$$\begin{aligned} D_1 &< D_{1\max,0,05} \\ 0,092554 &< 0,361 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Z této nerovnosti vyplývá, že lze přijmout nulovou hypotézu. Lze tedy tvrdit, že testovaný výběr se řídí teoretickým rozdělením pravděpodobnosti W2P s příslušnými parametry (pro parametry viz výše).

5.5 Výsledky výpočtů spolehlivosti

Výsledky jednotlivých výpočtů spolehlivosti výpočtových skupin jsou uvedeny v následujících tabulkách (tabulka č. 5.12 až tabulka č. 5.15):

Tabulka č. 5.12: Výsledky výpočtů spolehlivosti prototypu ev.č. 5001, část první [Autor]

5001	Celek	Brzdová soustava	Dveře	Elektronika	Klimatizace
N	115	2	8	27	1
m	0,8392	11,44	0,7058	0,951	-
-q	6,0903	88,081	5,9903	6,4771	-
R ²	0,8816	1	0,9408	0,896	-
t ₀	1 418,38	2 207,00	4 852,50	907,62	-
T _s	1 555,68	2 111,10	6 094,67	928,40	-
Výsledek testu dobré shody	Zamítám nulovou hypotézu	Nehodnoceno pro nedostatek dat	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu	Nehodnoceno pro nedostatek dat

Tabulka č. 5.13: Výsledky výpočtů spolehlivosti prototypu ev.č. 5001, část druhá [Autor]

5001	Kola a pneumatiky	Napájecí a hnací soustava	Nespecifikované opravy	Ostatní mechanické závady
N	5	11	33	30
m	0,6492	0,7461	0,8561	0,7825
-q	5,747	6,0886	6,0547	5,4238
R ²	0,9201	0,8572	0,8733	0,8549
t ₀	6 991,38	3 500,18	1 179,00	1023,899649
T _s	9 565,24	4 185,49	1 277,03	1179,054219
Výsledek testu dobré shody	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu

Tabulka č. 5.14: Výsledky výpočtů spolehlivosti kusově vyrobených vozů ev. č. 5002 až 5004, část první [Autor]

5002, 5003, 5004	Celek	Brzdová soustava	Dveře	Elektronika	Klimatizace
N	407	2	13	115	4
m	0,9925	1,3379	1,0299	0,9827	0,4287
-q	7,2986	14,303	8,8224	7,1802	4,4555
R ²	0,9029	1	0,982	0,8914	0,9829
t ₀	1 562,05	43 942,38	5 251,50	1 490,11	32 632,00
T _s	1 567,08	40 360,32	5 188,85	1 501,39	90 590,51
Výsledek testu dobré shody	Zamítám nulovou hypotézu	Nehodnoceno pro nedostatek dat	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu	Nehodnoceno pro nedostatek dat

Tabulka č. 5.15: Výsledky výpočtů spolehlivosti kusově vyrobených vozů ev. č. 5002 až 5004, část druhá [Autor]

5002, 5003, 5004	Kola a pneumatiky	Napájecí a hnací soustava	Nespecifikované opravy	Ostatní mechanické závady
N	6	19	103	157
m	0,9198	0,6033	0,9676	1,1412
-q	9,1976	5,2258	7,4782	7,8882
R ²	0,9687	0,911	0,9584	0,8934
t ₀	22 016,89	5 779,23	2 272,43	1 004,45
T _s	22 898,74	8 633,70	2 305,66	958,10
Výsledek testu dobré shody	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu	Nezamítám nulovou hypotézu

Z důvodu nedostatečného rozsahu poskytnutých dat, není možné hodnotit provozní spolehlivost některých skupin. Konkrétně se jedná o skupiny „Brzdová soustava“ a „Klimatizace“, kde počet poruch nedosahuje potřebného počtu 5 hodnot. Ve výše uvedených tabulkách v této podkapitole se nerovná počet celkových poruch se součtem poruch v jednotlivých skupinách. Toto je způsobeno vynecháním odlehlých pozorování při výpočtu. Tyto počty se liší o jedno odlehlé pozorování v případě prototypu a o dvanáct odlehlých pozorování v případě kusové výroby.

Výsledky parametru tvaru ($m < 1$) W2P potvrzují, že se jedná o vozidla, která jsou teprve ve fázi vývoje, a tudíž se nacházejí v období tzv. dětských nemocí. V některých skupinách, po vytvoření grafu pro lineární regresi, bylo zjištěno, že je možné, že některé výpočtové skupiny jsou složeny ze dvou částí. Toto bylo zjištěno, že pokud by se daná skupina rozdělila do dvou různých částí, pak by po proložení regresní přímky významně vzrostl kvadrát indexu korelace a vypočtené parametry tvaru pro W2P by se značně různily. Pravděpodobně se jedná o části složené z mechanických a elektronických zařízení. Toto je však z poskytnutých dat nemožné dohledat. Pro přesnější analýzu by bylo vhodné využít Weibullovo tříparametrické rozdělení, pro které bohužel v této bakalářské práci již není prostor.

Důležitým parametrem, který je potřeba srovnat mezi prototypem a kusovou výrobou, je střední ujetá vzdálenost do poruchy. Takto lze zjistit, zda-li došlo ke zlepšení spolehlivosti dané výpočtové skupiny při přechodu do kusové výroby (viz tabulka č. 5.16):

Tabulka č. 5.16: Srovnání střední ujeté vzdálenosti do poruchy [Autor]

Střední ujetá vzdálenost do poruchy [km]			
	5001	5002, 5003, 5004	Došlo ke
Celek	1 555,68	1 567,08	Zlepšení
Brzdová soustava	Nehodnotí se	Nehodnotí se	Nehodnotí se
Dveře	6 094,67	5 188,85	Zhoršení
Elektronika	928,40	1 501,39	Zlepšení
Klimatizace	Nehodnotí se	Nehodnotí se	Nehodnotí se
Kola a pneumatiky	9 565,24	22 898,74	Zlepšení
Napájecí a hnací soustava	4 185,49	8 633,70	Zlepšení
Nespecifikované opravy	1 277,03	2 305,66	Zlepšení
Ostatní mechanické závady	1 179,05	958,10	Zhoršení

6 Posouzení nákladů na údržbu

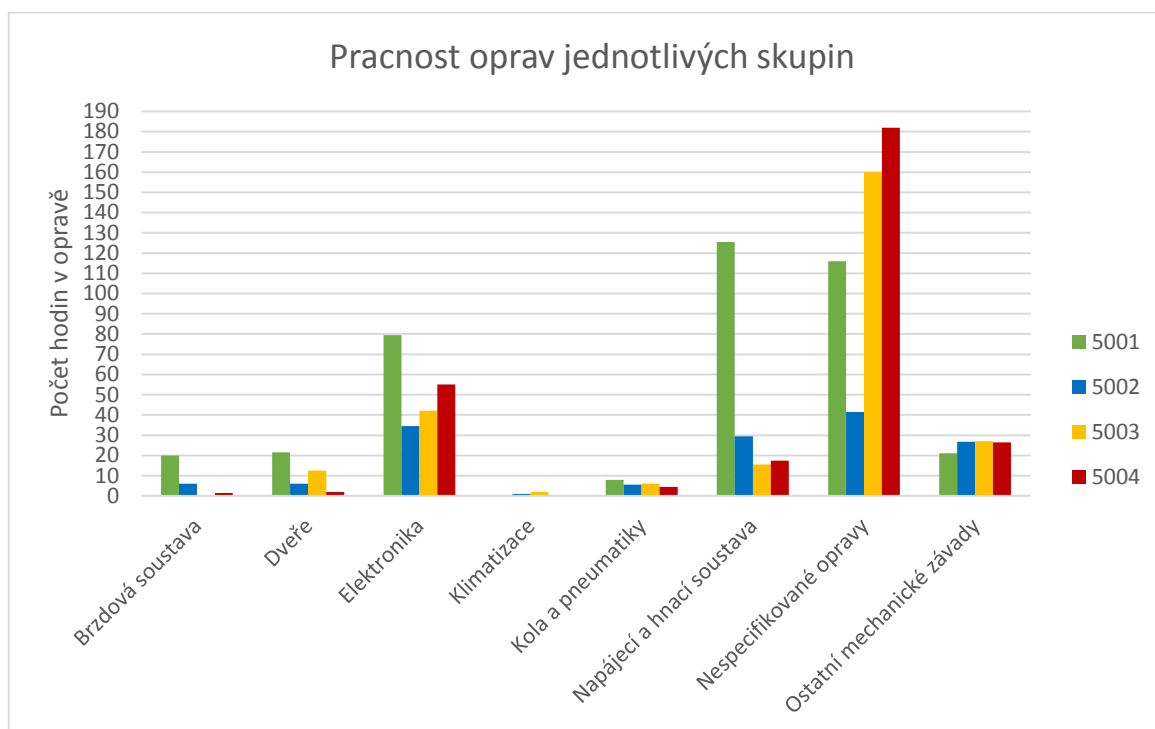
Posouzení nákladů na údržbu je provedeno pouze za roky 2012 a 2013, za které byla poskytnuta data. Tyto získané údaje jsou ve formě celkového součtu finančního obnosu na práci, materiál a jiné náklady za jednotlivé roky. Lze předpokládat, že prototyp vozidla bude finančně náročnější na údržbu než vozy kusové výroby. Tento výrok bude následně ověřen.

Jelikož každý jednotlivý zásah, který byl vykonáván ze strany DPO a.s, byl označen a byly k němu přiřazeny odpracované hodiny, bylo možné zjistit pracnost oprav na jednotlivých výpočetních skupinách. Tato pracnost je uvedena v tabulce č. 6.1:

Tabulka č. 6.1: Pracnost oprav na jednotlivých skupinách u všech elektrobusů. Hodnoty jsou uvedeny v hodinách. [Autor]

Skupina / vozidlo	5001	5002	5003	5004	Celkem
Brzdová soustava	20	6	0	1,5	27,5
Dveře	21,5	6	12,5	2	42
Elektronika	79,5	34,5	42,04	55,06	211,1
Klimatizace	0	1	2	0	3
Kola a pneumatiky	8	5,5	6	4,5	24
Napájecí a hnací soustava	125,5	29,5	15,5	17,5	188
Nespecifikované opravy	116	41,5	160	182	499,5
Ostatní mechanické závady	21	26,8	27	26,5	101,3
Celkem	391,5	150,8	265,04	289,06	1096,4

Tato pracnost je dále porovnána v následujícím grafu (obr. č. 6.1):



Obr. č. 6.1: Pracnost oprav jednotlivých skupin elektrobusů [Autor]

Jelikož data byla poskytnuta pro každé vozidlo a rok zvlášť, je vhodné vyhotovit každému vozidlu tabulku, v níž je uveden přehled nákladů. Protože vozidla za dané období ujela jinou vzdálenost, byly tyto náklady vztaženy na jeden ujetý kilometr (viz tabulka č. 6.2 až tabulka č. 6.6).

Tabulka č. 6.2: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5001 [Autor]

5001		Práce [Kč]	Materiál [Kč]	Ostatní náklady [Kč]	Ujeto km	Součet hodin
	2012	35 187	56 738	40 297	34 851	391,5
	2013	85 010	64 629	290 749	16 486	
	Součet	120 198	121 368	331 046	51 337	
	Náklady na 1 km	Práce [Kč/km]	Materiál [Kč/km]	Ostatní náklady [Kč/km]	Celkem	
	2012	1,010	1,628	1,156	3,794	
	2013	5,157	3,920	17,636	26,713	
	Za oba roky	2,341	2,364	6,448	11,154	

Tabulka č. 6.3: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5002 [Autor]

5002		Práce [Kč]	Materiál [Kč]	Ostatní náklady [Kč]	Ujeto km	Součet hodin
	2012	32 339	7 867	29 107	36 975	150,8
	2013	59 527	58 643	20 620	45 860	
	Součet	91 867	66 509	49 727	82 835	
	Náklady na 1 km	Práce [Kč/km]	Materiál [Kč/km]	Ostatní náklady [Kč/km]	Celkem	
	2012	0,875	0,213	0,787	1,875	
	2013	1,298	1,279	0,450	3,026	
	Za oba roky	1,109	0,803	0,600	2,512	

Tabulka č. 6.4: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5003 [Autor]

5003		Práce [Kč]	Materiál [Kč]	Ostatní náklady [Kč]	Ujeto km	Součet hodin
	2012	27 878	9 199	39 914	55 191	265,04
	2013	57 923	24 636	39 357	45 668	
	Součet	85 802	33 834	79 271	100 859	
	Náklady na 1 km	Práce [Kč/km]	Materiál [Kč/km]	Ostatní náklady [Kč/km]	Celkem	
	2012	0,505	0,167	0,723	1,395	
	2013	1,268	0,539	0,862	2,670	
	Za oba roky	0,851	0,335	0,786	1,972	

Tabulka č. 6.5: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5004 [Autor]

5004		Práce [Kč]	Materiál [Kč]	Ostatní náklady [Kč]	Ujeto km	Součet hodin
	2012	25 782	13 325	40 056	53 853	289,06
	2013	77 021	24 281	26 223	49 192	
	Součet	102 803	37 606	66 279	103 045	
	Náklady na 1 km	Práce [Kč/km]	Materiál [Kč/km]	Ostatní náklady [Kč/km]	Celkem	
	2012	0,479	0,247	0,744	1,470	
	2013	1,566	0,494	0,533	2,592	
	Za oba roky	0,998	0,365	0,643	2,006	

Tabulka č. 6.6: Přehled nákladů elektrobusů celkem [Autor]

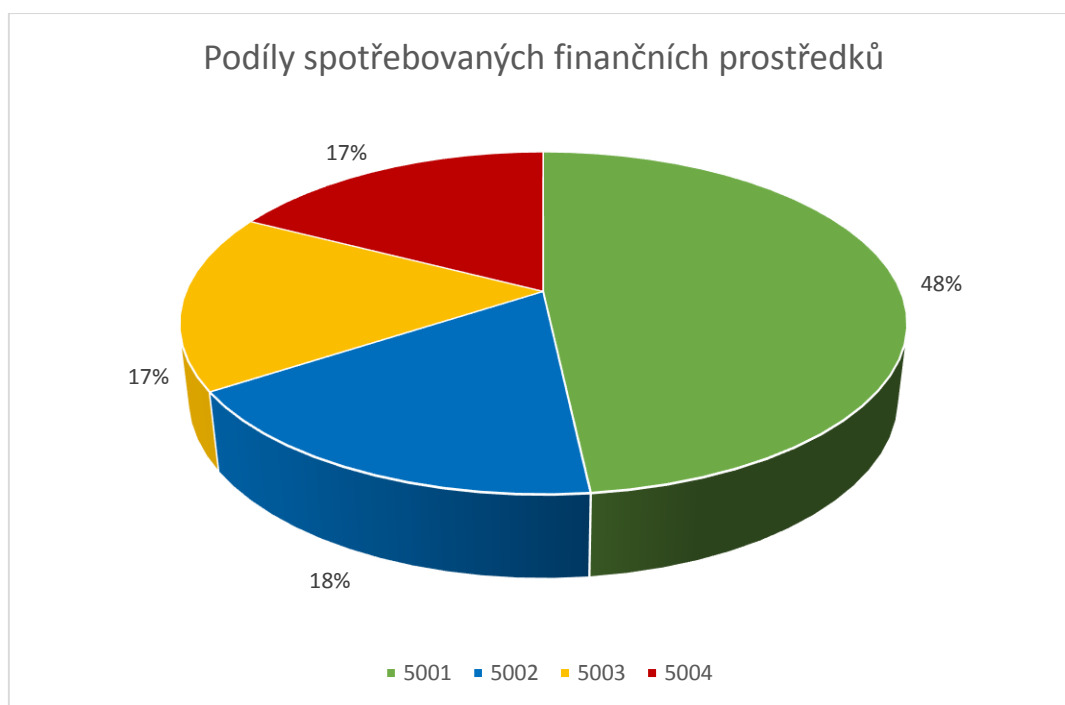
Celkem		Práce [Kč]	Materiál [Kč]	Ostatní náklady [Kč]	Ujeto km	Součet hodin
	2012	121 187	87 129	149 375	180 870	1096,4
	2013	279 482	172 189	376 949	157 206	
	Součet	400 669	259 317	526 323	338 076	
	Náklady na 1 km	Práce [Kč/km]	Materiál [Kč/km]	Ostatní náklady [Kč/km]	Celkem	
	2012	0,670	0,482	0,826	1,978	
	2013	1,778	1,095	2,398	5,271	
	Za oba roky	1,185	0,767	1,557	3,509	

Jakmile jsou vypočteny tyto hodnoty, je možné vytvořit následující souhrnné tabulky nákladů za poslední dva roky provozu elektrobusů (tabulka č. 6.7).

Tabulka č. 6.7: Souhrnný přehled nákladů na údržbu elektrobusů [Autor]

Vozidlo	Ujeto km	Práce [Kč]	Materiál [Kč]	Ostatní náklady [Kč]	Celkem náklady [Kč]
5001	51 337	120 198	121 368	331 046	572 612
5002	82 835	91 867	66 509	49 727	208 103
5003	100 859	85 802	33 834	79 271	198 907
5004	103 045	102 803	37 606	66 279	206 688
Celkem	338 076	400 669	259 317	526 323	1 186 310

Přecházející tabulku lze přehledně zobrazit v koláčovém grafu, který zobrazuje podíly nákladů jednotlivých elektrobusů z celkové částky, potřebné na jejich údržbu (viz obr. č. 6.2)



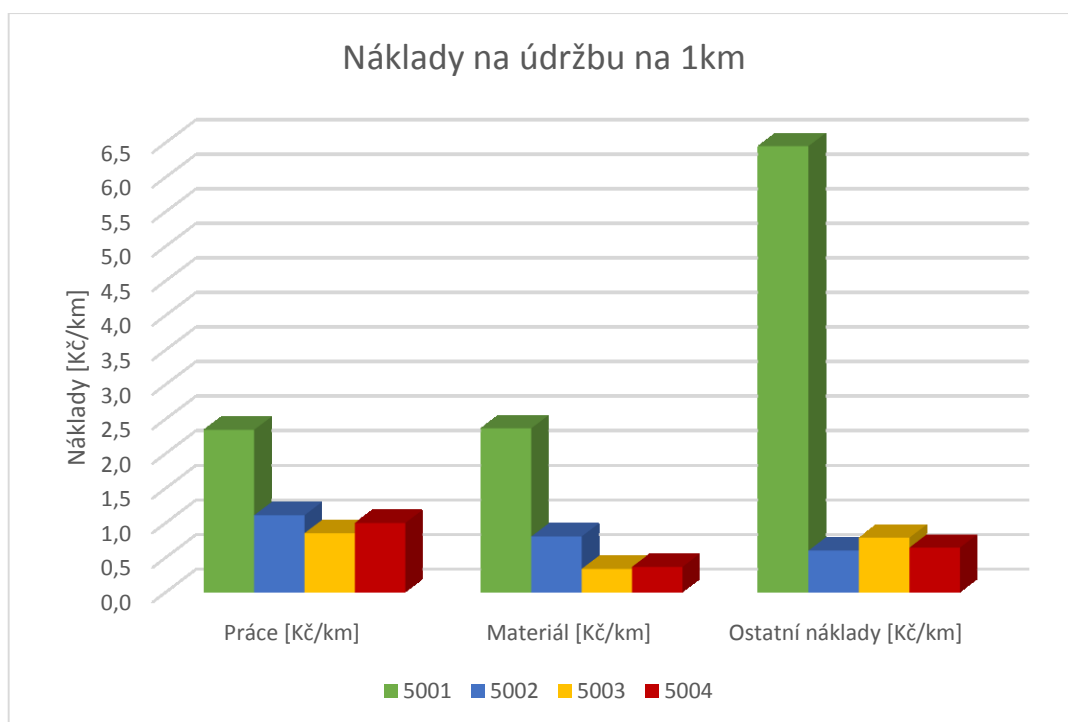
Obr. č. 6.2: Podíly spotřebovaných finančních prostředků [Autor]

Jelikož tyto elektrobusy mají různý nájezd, byla z přechozích tabulek (tabulka č. 6.2 až tabulka č. 6.5) vytvořena souhrnná tabulka (viz tabulka č. 6.8), kde jsou náklady na údržbu vztažené na jeden ujetý kilometr.

Tabulka č. 6.8: Souhrnný přehled nákladů na údržbu elektrobusů na jeden ujetý kilometr [Autor]

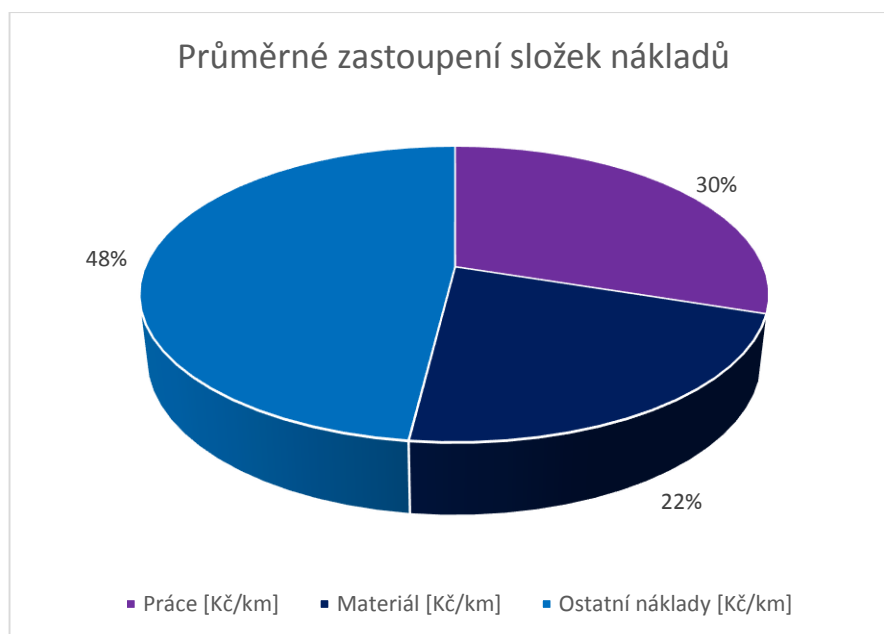
Vozidlo	Práce [Kč/km]	Materiál [Kč/km]	Ostatní náklady [Kč/km]	Celkem
5001	2,341	2,364	6,448	11,154
5002	1,109	0,803	0,600	2,512
5003	0,851	0,335	0,786	1,972
5004	0,998	0,365	0,643	2,006
Průměr	1,325	0,967	2,119	4,411

Z takto vyhotovené tabulky lze vytvořit sloupcový graf (viz obr. č. 6.3), ve kterém jsou porovnány náklady na údržbu na jeden kilometr provozu všech čtyř elektrobusů. Graf zahrnuje kategorie: Náklady na práci, náklady na materiál a ostatní náklady.



Obr. č. 6.3: Náklady na údržbu na jeden ujetý kilometr [Autor]

Nakonec byl z celkových nákladů na práci, na materiál a ostatních nákladů na údržbu vytvořen graf (viz obr. č. 6.4), který zobrazuje jednotlivé zastoupení skupin v celkových nákladech na údržbu.



Obr. č. 6.4: Průměrné zastoupení složek nákladů [Autor]

7 Závěr

V bakalářské práci jsem dospěl k závěru, že spolehlivost jednotlivých konstrukčních celků se při kusové výrobě elektrobuse zlepšila oproti prototypu. Při hodnocení střední ujeté vzdálenosti do poruchy došlo k následným změnám:

- Ve skupině soustavy ovládající dveře došlo ke zhoršení z průměrně 6094,67 ujetých kilometrů do poruchy na 5188,85km. To odpovídá zhoršení o 14,86%.
- Ve skupinách obsahujících elektroniku došlo ke zlepšení a to z 928,4 ujetých kilometrů bez poruchy na 1501,39 kilometrů bez poruchy, což značí zlepšení spolehlivosti přibližně o 61%.
- Dále došlo ke zlepšení na skupině nazvané kola a pneumatiky, kdy došlo ke změně z 9565,24 ujetých kilometrů do poruchy u prototypu na 22898,74 ujetých kilometrů u kusové výroby. Toto zlepšení spolehlivosti je přibližně o 139,4% kusové výroby oproti prototypu.
- Následně spolehlivostní výpočty ukázaly, že došlo také k významnému zlepšení v napájecí a hnací soustavě, kdy byl navýšen počet ujetých kilometrů do poruchy kusové výroby oproti prototypu z 4185,49km na 8633,7km, což odpovídá nárůstu provozní spolehlivosti přibližně o 106,27%.
- Spolehlivostní výpočty ukázaly, že se zlepšila střední hodnota ujeté vzdálenosti do poruchy ve skupině tzv. nespecifikovaných oprav, kde tyto opravy nebylo možno zařadit do žádné jiné skupiny, neboť z poskytnutých dat nebyl znám charakter poruchy. Ovšem tato skupina byla dosti početně zastoupena a tak ji bylo možno hodnotit. Došlo ke změně střední ujeté vzdálenosti z 1277,03km na 2305,66km, což představuje zlepšení o 80,55% u kusové výroby oproti prototypu.
- Ve skupině ostatních mechanických závad, tedy skupině, kde z poskytnutých dat nebylo známo nic jiného, než že došlo k závadě na mechanickém zařízení vozidla, došlo k poklesu střední ujeté vzdálenosti z 1179,05km na 958,1km. To odpovídá poklesu o 19,74%.

- Nastaly i případy, kdy bylo ve skupině příliš málo poruch, a tudíž tyto skupiny nebylo možné hodnotit. Konkrétně se jednalo o skupinu brzdové soustavy a o poruchy na klimatizaci.

Jelikož nevyšly testy dobré shody pro Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti u elektrobuse jako celku, následující výsledek nemá příliš významnou hodnotu důvěrnosti. Avšak pokud by byl test dobré shody ignorován, bylo by možné říci, že spolehlivost kusové výroby elektrobuse se zvýšila z 1555,68 ujetých kilometrů do poruchy na 1567,08km. To by znamenalo nárůst spolehlivosti o 0,7%, což je zanedbatelná hodnota. Protože však tento test dobré shody nevyšel, a bylo nutno zamítnout nulovou hypotézu, že vypočtené W2P odpovídá výběrovému rozdělení pravděpodobnosti, bylo by nutné provést pro elektrobuse jako celek nový výpočet spolehlivosti. Tento nový výpočet by bylo potřeba provést na základě odhadů parametrů pro tříparametrické Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti. To však již rozsah bakalářské práce neumožňuje.

Po ekonomickém zhodnocení nákladů na údržbu elektrobuse jsem dospěl k závěru, že finančně nejnáročnější je prototyp elektrobuse (ev. č. 5001), kdy z celkových nákladů na údržbu elektrobuse činí náklady na údržbu tohoto závratných elektrobuse 48%. To znamená, že zbylých 52% si mezi sebe rozdělují ostatní elektrobuse, tedy ty vyrobené jako kusová výroba. Náklady na vozidlo s evidenčním číslem 5002 činí 18% celkových nákladů a náklady na zbylé dva elektrobuse (ev. č. 5003 a 5004) činí shodně po 17% z celkových nákladů.

Z důvodu různého nájezdu kilometrů u jednotlivých elektrobuse byly celkové sumy nákladů vztáhnuty na jeden ujetý kilometr z důvodu lepší vypovídající hodnoty. Tyto jednotkové náklady na údržbu kopírují celkové náklady a potvrzují předešlé tvrzení, že prototyp je nejvíce nákladný. Nutno podotknout, že náklady na údržbu prototypu značně převyšují náklady na ostatní elektrobuse. Tyto náklady jsou vyčísleny na 11,154Kč/km. Za prototypem následuje první kusově vyrobený elektrobuse s evidenčním číslem 5002 s jednotkovými náklady na údržbu ve výši 2,512Kč/km, poté je v pořadí vozidlo s ev.č. 5004 s jednotkovými náklady ve výši 2,006Kč/km a nejméně nákladné vozidlo jezdí pod evidenční číslem 5003 s jednotkovými náklady na údržbu 1,972Kč/km. Tyto jednotkové náklady na údržbu naznačují, že na prototypu elektrobuse došlo k masivní opravě závad

většího rozsahu, což dokazuje i fakt, který lze vyčíst ze získaných dat, že tento elektrobus za měsíce říjen a listopad roku 2013 nemá v záznamech zapsán ani jediný ujetý kilometr.

Seznam obrázků

Obr. č. 2.1: Elektrobus SOR EBN 10,5.....	10
Obr. č. 3.1: Spolehlivost dle ISO 9000:2000	12
Obr. č. 3.2: Průběhy poruch: 1 - postupná, 2 - náhlá, 3 – kombinovaná.....	14
Obr. č. 3.3: Vanová křivka	15
Obr. č. 3.4: Schéma nákladů na spolehlivost (LCC).....	16
Obr. č. 4.1: Kvantily spojitě náhodné veličiny.....	21
Obr. č. 4.2: Hustota pravděpodobnosti (vlevo) a distribuční funkce (vpravo) exponenciálního rozdělení.....	22
Obr. č. 4.3: Hustota pravděpodobnosti s vyznačenou oblastí $\pm\sigma$ (vlevo) a distribuční funkce (vpravo)	23
Obr. č. 4.4: Hustota pravděpodobnosti (vlevo) a distribuční funkce (vpravo) pro W2P s různými hodnotami parametru m.....	25
Obr. č. 5.1: Rozsah dat v korespondenci s ujetými kilometry	29
Obr. č. 5.2: Rozdělení získaných dat do skupin	30
Obr. č. 5.3: Histogram poruch.....	32
Obr. č. 5.4: Histogram ujetých kilometrů na 1 poruchu.....	33
Obr. č. 5.5: Graf lineární regrese.....	35
Obr. č. 5.6: Graf hustoty pravděpodobnosti pro skupinu Dveře kusové výroby.....	37
Obr. č. 5.7: Graf provozní spolehlivosti pro skupinu Dveře kusové výroby	38
Obr. č. 6.1: Pracnost oprav jednotlivých skupin elektrobusů.....	43
Obr. č. 6.2: Podíly spotřebovaných finančních prostředků	46
Obr. č. 6.3: Náklady na údržbu na jeden ujetý kilometr	47
Obr. č. 6.4: Průměrné zastoupení složek nákladů.....	47

Seznam tabulek

Tabulka č. 5.1: Ukázka ze souboru dat pro elektrobus ev. č. 5002.....	29
Tabulka č. 5.2: Doba do poruchy u elektrobusu ev. č. 5002 ve skupině Dveře.....	31
Tabulka č. 5.3: První tři výpočty distribuční funkce výběrového rozdělení pravděpodobnosti.....	34
Tabulka č. 5.4: Výpočet přirozeného logaritmu.....	34
Tabulka č. 5.5: Výpočet hodnoty Y	34
Tabulka č. 5.6: Tabelární přehled hodnot po lineární regresi	35
Tabulka č. 5.7: Tabelární přehled hodnot W2P	36
Tabulka č. 5.8: Výpočet hustoty pravděpodobnosti.....	36
Tabulka č. 5.9: Výpočet distribuční funkce W2P	37
Tabulka č. 5.10: Výpočet provozní spolehlivosti.....	37
Tabulka č. 5.11: Výpočet rozdílů distribučních funkcí.....	38
Tabulka č. 5.12: Výsledky výpočtů spolehlivosti prototypu ev.č. 5001, část první	39
Tabulka č. 5.13: Výsledky výpočtů spolehlivosti prototypu ev.č. 5001, část druhá.....	40
Tabulka č. 5.14: Výsledky výpočtů spolehlivosti kusově vyrobených vozů ev. č. 5002 až 5004, část první	40
Tabulka č. 5.15: Výsledky výpočtů spolehlivosti kusově vyrobených vozů ev. č. 5002 až 5004, část druhá	40
Tabulka č. 5.16: Srovnání střední ujeté vzdálenosti do poruchy	41
Tabulka č. 6.1: Pracnost oprav na jednotlivých skupinách u všech elektrobusů. Hodnoty jsou uvedeny v hodinách.	42
Tabulka č. 6.2: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5001	43
Tabulka č. 6.3: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5002.....	44
Tabulka č. 6.4: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5003.....	44
Tabulka č. 6.5: Přehled nákladů elektrobusu ev. č. 5004.....	44
Tabulka č. 6.6: Přehled nákladů elektrobusů celkem.....	45
Tabulka č. 6.7: Souhrnný přehled nákladů na údržbu elektrobusů	45
Tabulka č. 6.8: Souhrnný přehled nákladů na údržbu elektrobusů na jeden ujetý km ..	46

Seznam použité literatury

- [1] Dopravní podnik Ostrava a.s., Vozový park [online], 2014, [cit. 2014-01-02].
Dostupné z: <http://www.dpo.cz/o-spolecnosti/vozy/219-sor-ebn-10.html>
- [2] Famfulík, J., Krzyžanek, R., Galvas, P., Zkoušky spolehlivosti – vybrané stochastické metody [online]. VŠB-TUO, Ostrava, 2009, 69 s. Dostupné z: <http://vyuka.fs.vsb.cz/mod/resource/view.php?id=5404>
- [3] Famfulík, J., Míková, J., Krzyžanek, R., Teorie údržby, Ostrava 2007, ISBN 978-50-248-1509-1. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/>
- [4] Otipka, P., Šmajstrla, V., Pravděpodobnost a statistika [online], [cit. 2014-03-10]
Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/>
- [5] Západočeská univerzita, Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy [online], 2014, [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.kmt.zcu.cz/person/Kohout/info_soubory/letnisem/ruzne/KSjednovyber.pdf
- [6] Daněk, A., Široký, J.: Teorie obnovy dopravních prostředků, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1999, ISBN 80-7078-568-3
- [7] Slánský, M.: Diagnostická analýza a diagnostické znalostní systémy, Ostrava/Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, ISBN 978-80-248-3275-3
- [8] Vintr, Z., Holub, R. Základy spolehlivosti, Brno: Vojenská akademie 2002

Seznam příloh

Příloha A – kritické hodnoty pro test dobré shody Kolmogorov-Smirnov

Příloha B – elektrobus 5001, skupina dveře

Příloha C – elektrobus 5001, skupina elektronika

Příloha D – elektrobus 5001, skupina kola a pneumatiky

Příloha E – elektrobus 5001, skupina napájecí a hnací soustava

Příloha F – elektrobus 5001, skupina nespecifikované opravy

Příloha G – elektrobus 5001, skupina ostatní mechanické závady

Příloha H – elektrobus 5001 jako celek

Příloha I – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina elektronika

Příloha J – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina kola a pneumatiky

Příloha K – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina napájecí a hnací soustava

Příloha L – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina nespecifikované opravy

Příloha M – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina ostatní mechanické
závady

Příloha N – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004 jako celek

Multimediální příloha ve formě CD

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Famfulíkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při konzultaci při vytváření této práce.

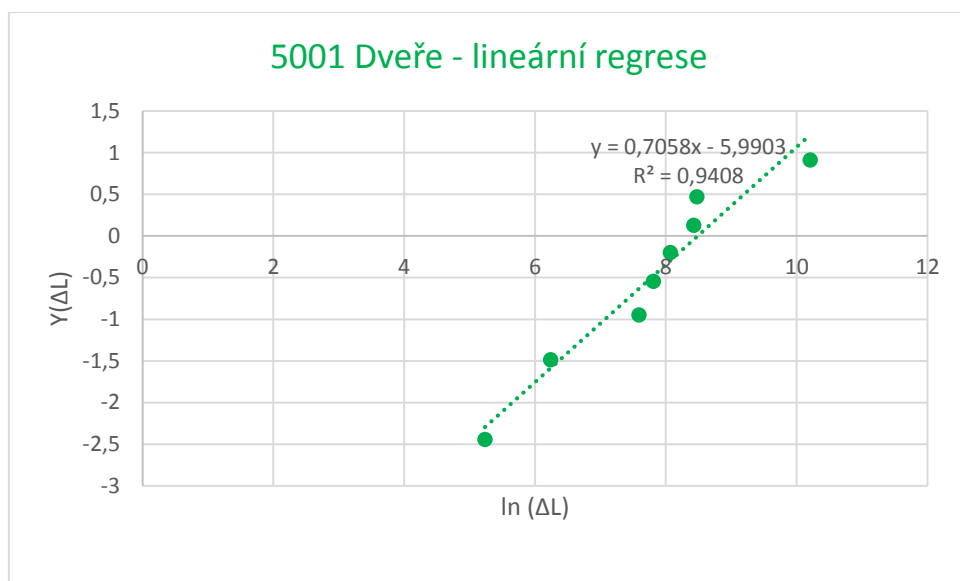
Příloha A – kritické hodnoty pro test dobré shody Kolmogorov - Smirnov

Kritické hodnoty $D_n(\alpha)$ pro jednovýběrový Kolmogor - Smirnov test

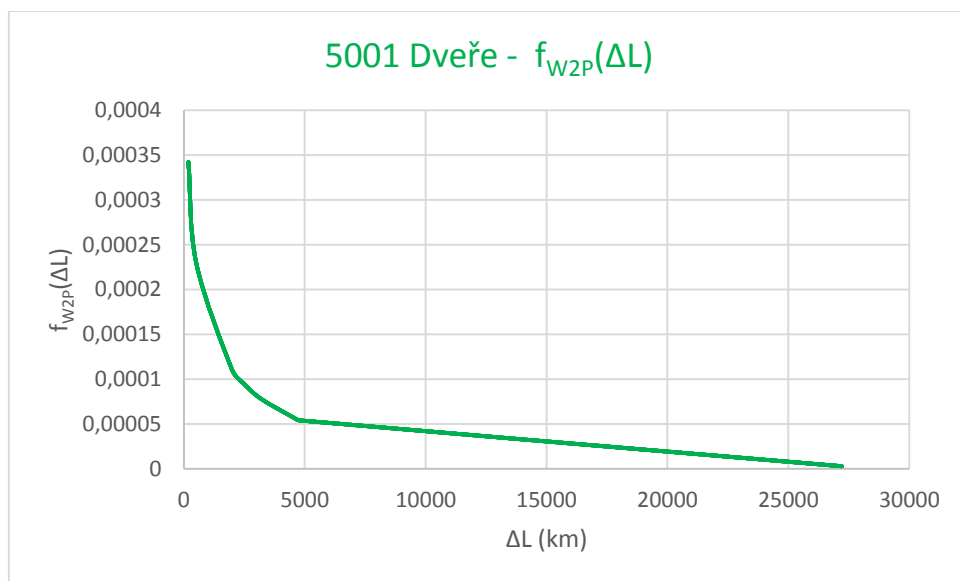
Hladina významnosti α				Hladina významnosti α				Hladina významnosti α			
n	0,1	0,05	0,01	n	0,1	0,05	0,01	n	0,1	0,05	0,01
1	0,950	0,975	0,95	16	0,295	0,327	0,392	31	0,214	0,238	0,285
2	0,776	0,842	0,929	17	0,286	0,318	0,381	32	0,211	0,234	0,281
3	0,636	0,708	0,829	18	0,279	0,309	0,371	33	0,208	0,231	0,277
4	0,565	0,625	0,734	19	0,271	0,301	0,361	34	0,205	0,227	0,273
5	0,509	0,563	0,669	20	0,265	0,294	0,352	35	0,202	0,224	0,269
6	0,468	0,519	0,617	21	0,259	0,287	0,344	36	0,199	0,221	0,265
7	0,436	0,483	0,576	22	0,253	0,281	0,337	37	0,196	0,218	0,262
8	0,410	0,454	0,542	23	0,247	0,275	0,330	38	0,194	0,215	0,258
9	0,387	0,430	0,513	24	0,242	0,269	0,323	39	0,191	0,213	0,255
10	0,369	0,409	0,489	25	0,238	0,264	0,317	40	0,189	0,210	0,252
11	0,352	0,391	0,468	26	0,233	0,259	0,311	45	0,179	0,198	0,238
12	0,338	0,375	0,449	27	0,229	0,254	0,305	50	0,170	0,188	0,226
13	0,325	0,361	0,432	28	0,225	0,250	0,300	55	0,162	0,180	0,216
14	0,314	0,349	0,418	29	0,221	0,246	0,295	60	0,155	0,172	0,207
15	0,304	0,338	0,404	30	0,218	0,242	0,290				

Obr. č. A.1: Kritické hodnoty pro test dobré shody Kolmogorov-Smirnov [5]

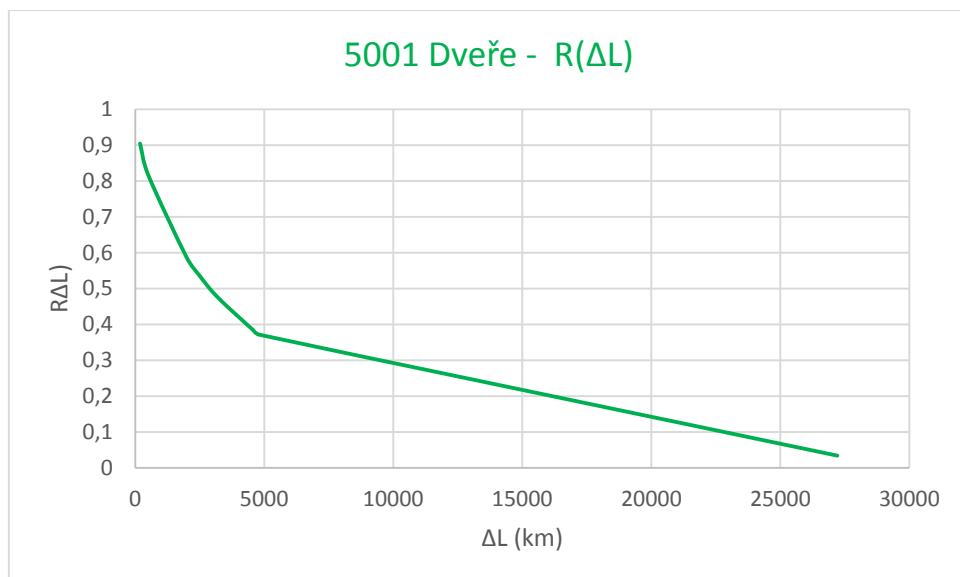
Příloha B – elektrobus 5001, skupina Dveře



Obr. č. B.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. B.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. B.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. B.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	8
m	0,7058
-q	5,9903
R ²	0,9408
t ₀	4852,496
T _s	6094,672

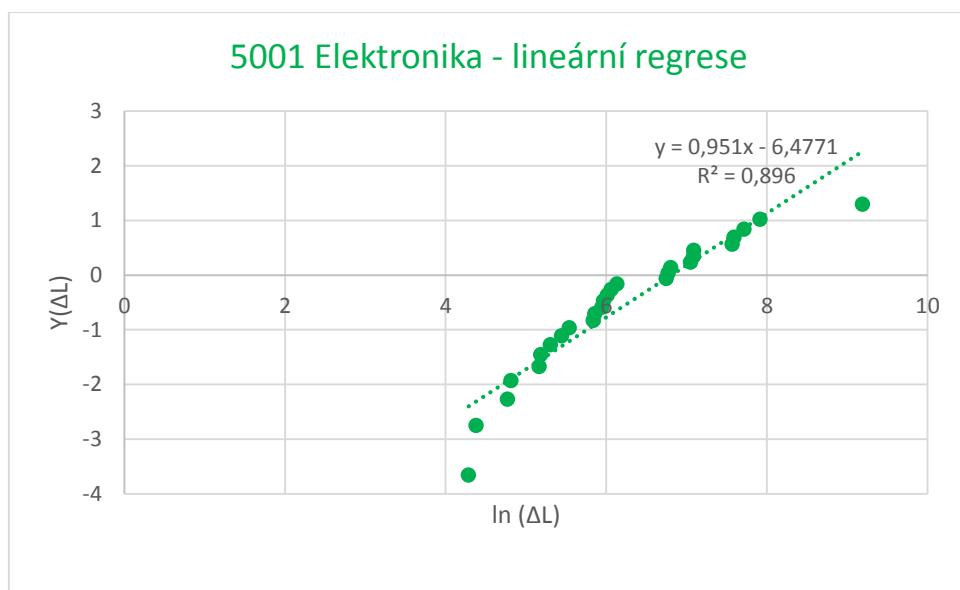
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

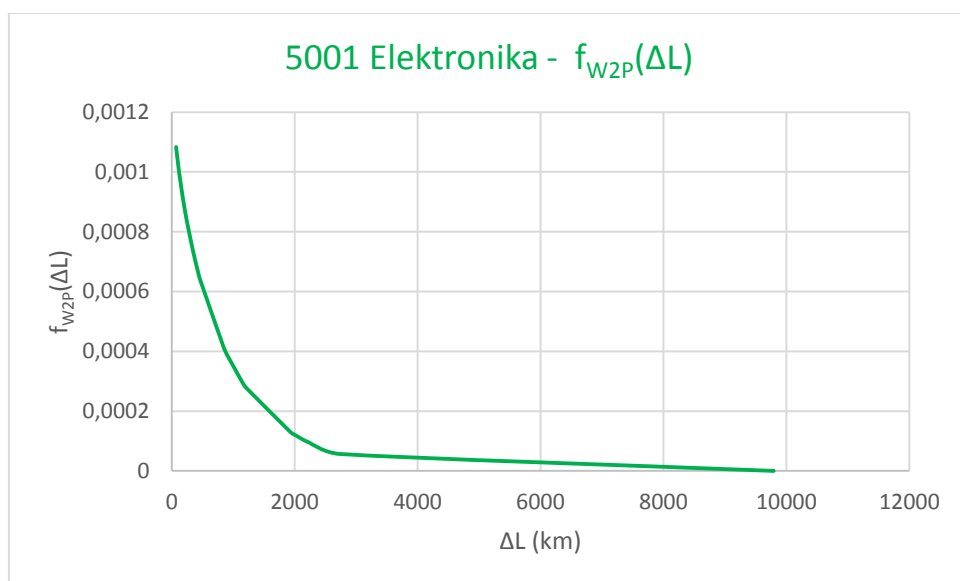
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{4852,496}\right)^{0,7058}} \quad (B.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

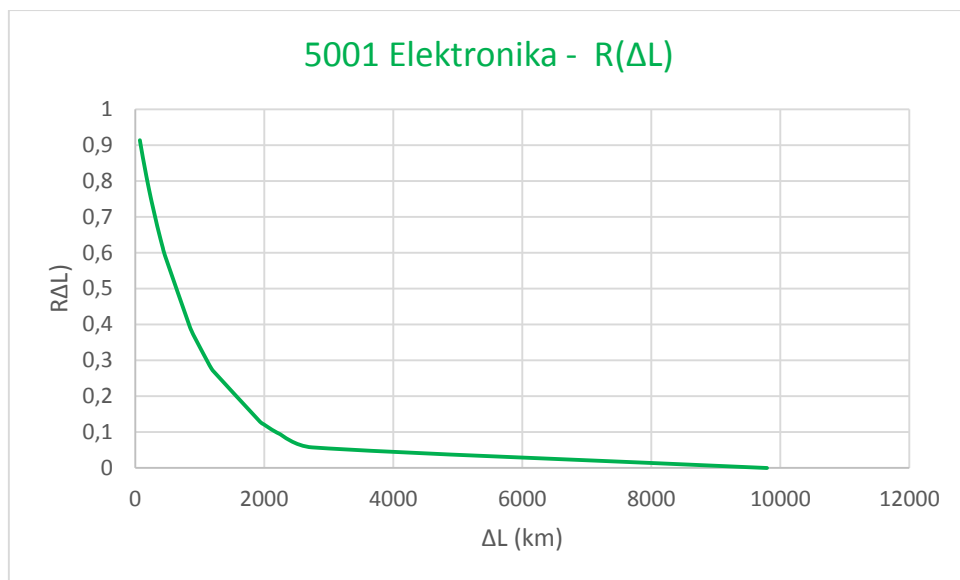
Příloha C - elektrobus 5001, skupina Elektronika



Obr. č. C.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. C.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. C.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. C.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	27
m	0,951
-q	6,4771
R ²	0,896
t ₀	907,6245
T _s	928,399

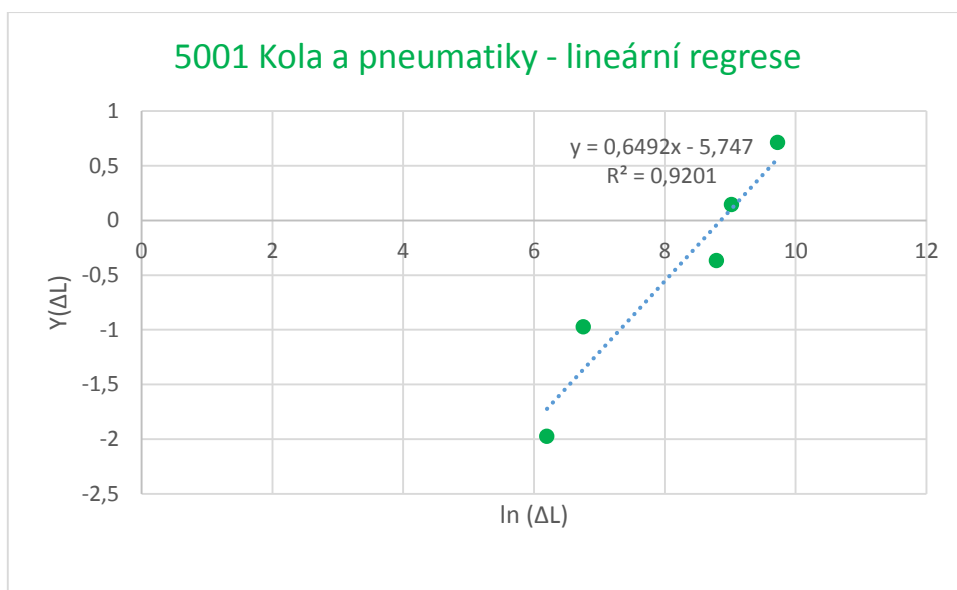
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

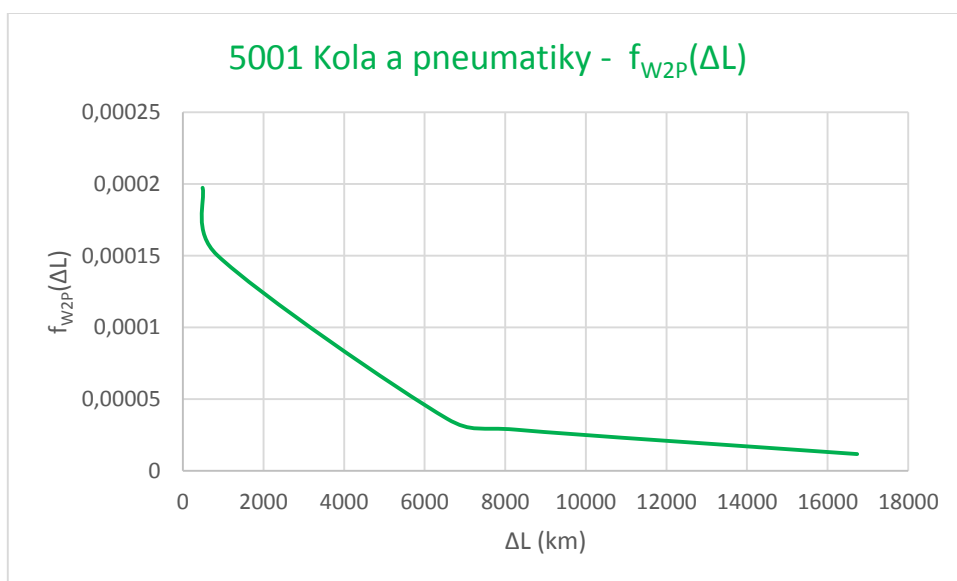
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{907,6445}\right)^{0,951}} \quad (C.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

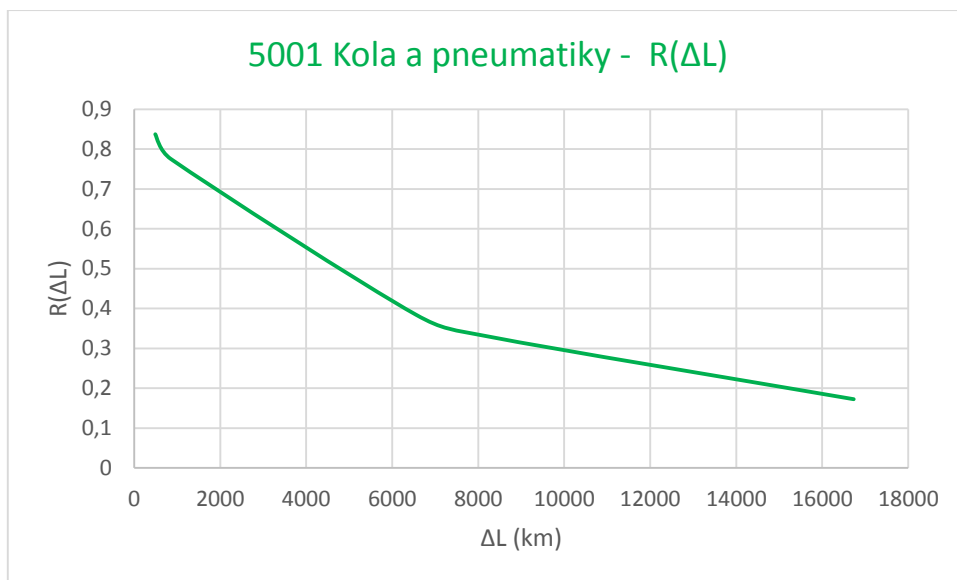
Příloha D – elektrobus 5001, skupina Kola a pneumatiky



Obr. č. D.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. D.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. D.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. D.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	5
m	0,6492
-q	5,747
R ²	0,9201
t ₀	6991,384
T _s	9565,24

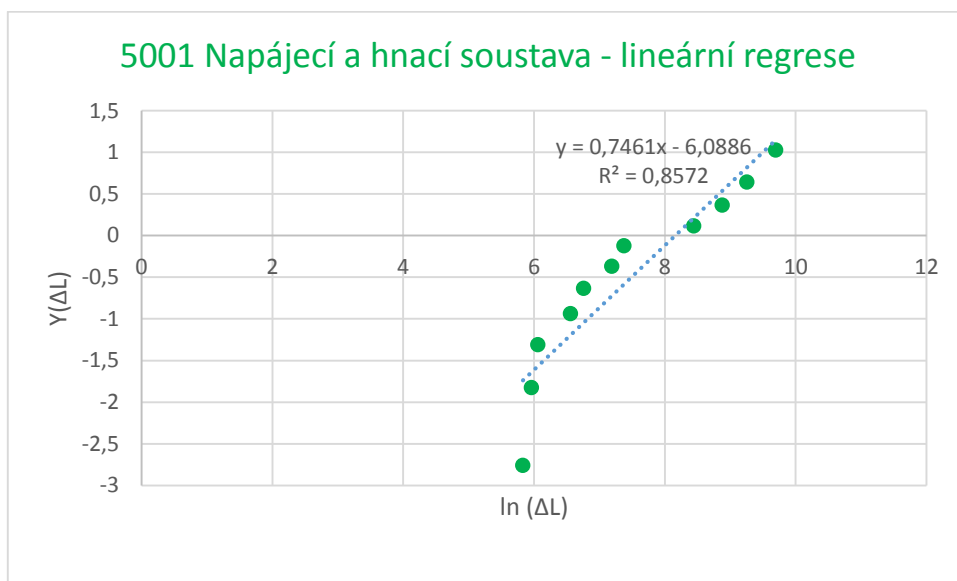
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

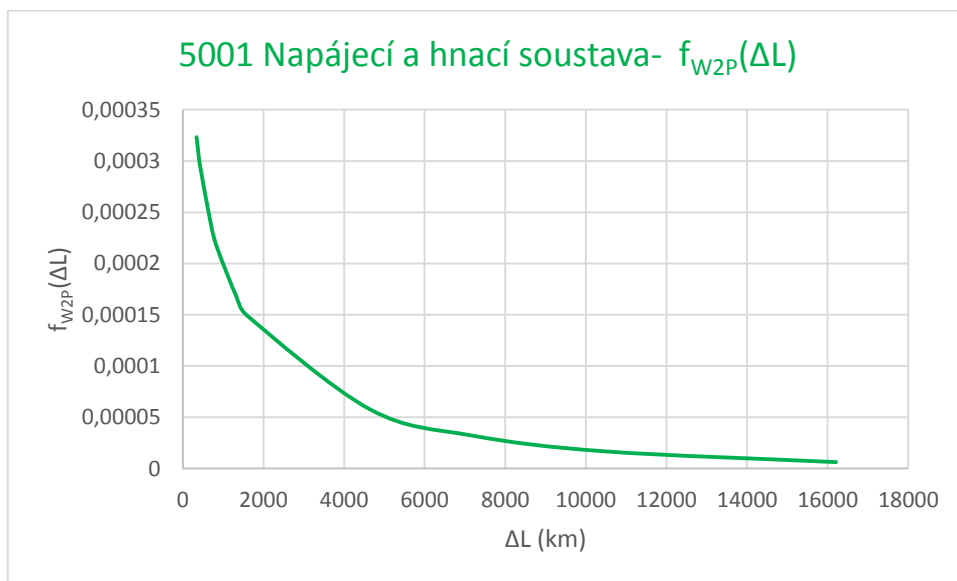
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{6991,384}\right)^{0,6492}} \quad (D.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

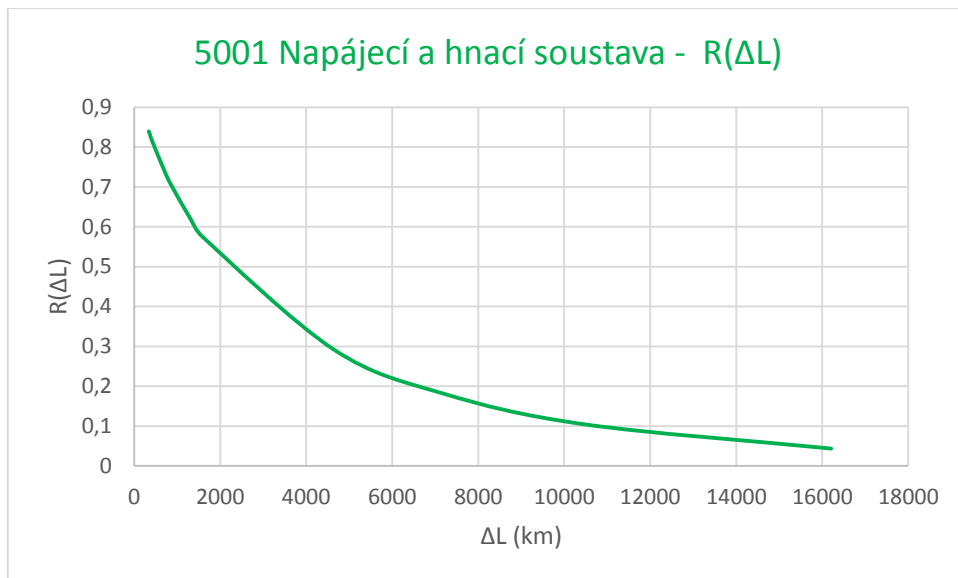
Příloha E – elektrobus 5001, skupina Napájecí a hnací soustava



Obr. č. E.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. E.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. E.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. E.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	11
m	0,7461
-q	6,0886
R ²	0,8572
t ₀	3500,175
T _s	4185,488

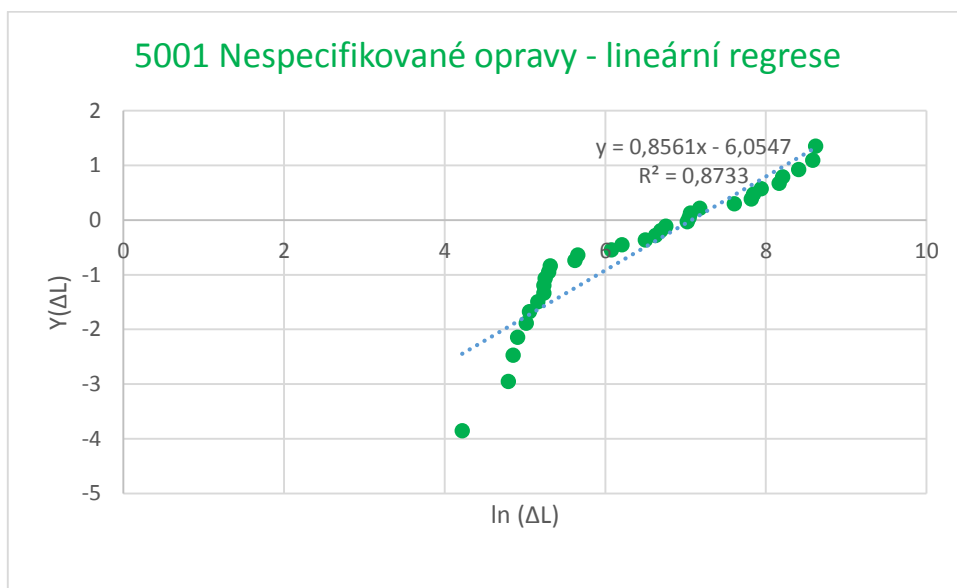
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

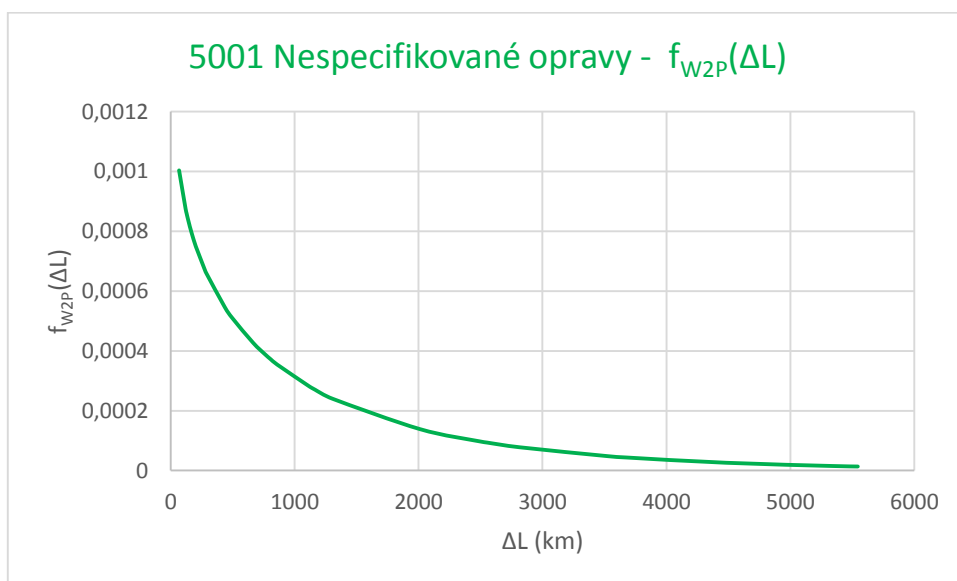
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{3500,175}\right)^{0,7461}} \quad (E.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

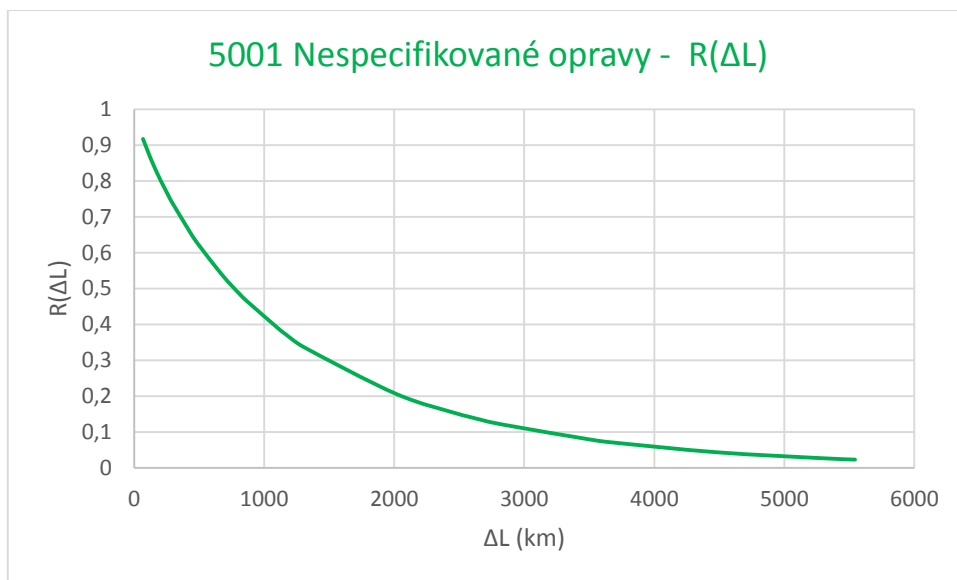
Příloha F – elektrobus 5001, skupina Nespecifikované opravy



Obr. č. F.1 Odhad parametrů W_{2P} lineární regrese [Autor]



Obr. č. F.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. F.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. F.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	33
m	0,8561
-q	6,0547
R ²	0,8733
t ₀	1178,999
T _s	1277,031

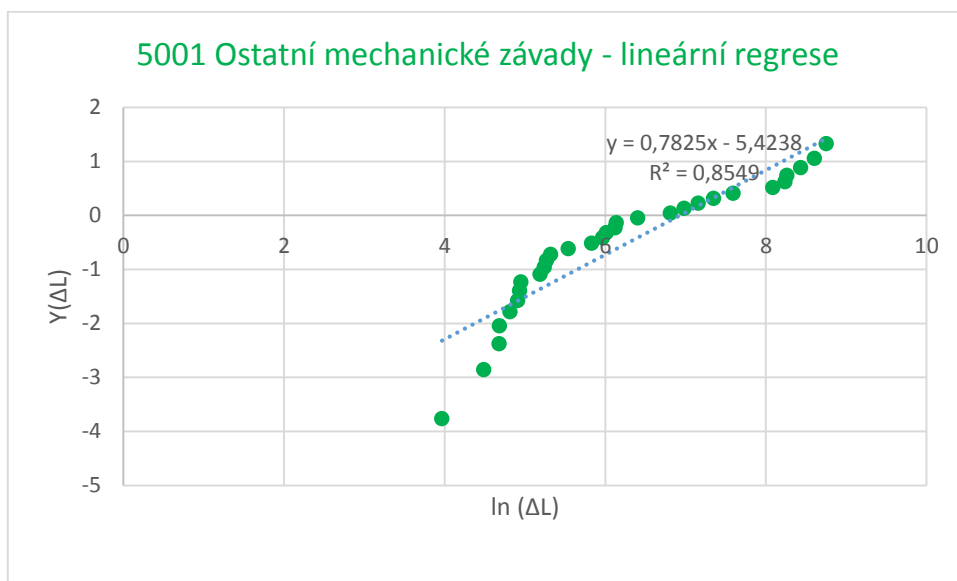
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

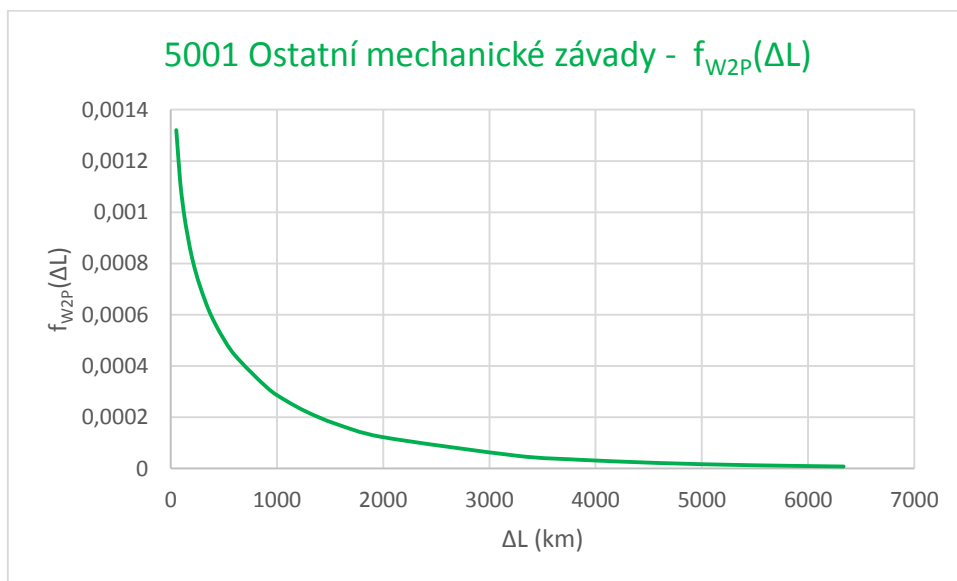
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{1178,999}\right)^{0,8561}} \quad (F.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

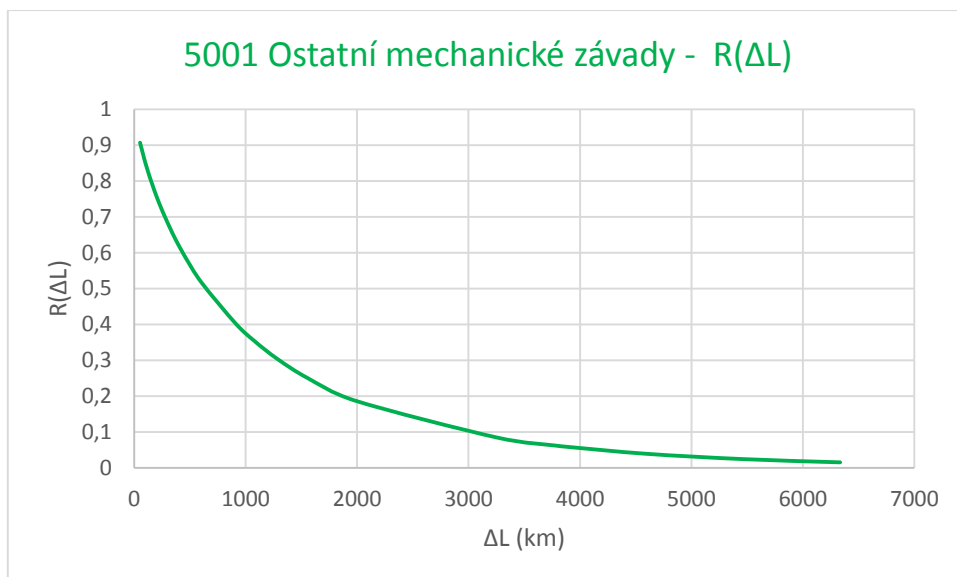
Příloha G – elektrobus 5001, skupina Ostatní mechanické závady



Obr. č. G.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. G.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. G.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. B.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	30
m	0,7825
-q	5,4238
R ²	0,8549
t ₀	1023,9
T _s	1179,054

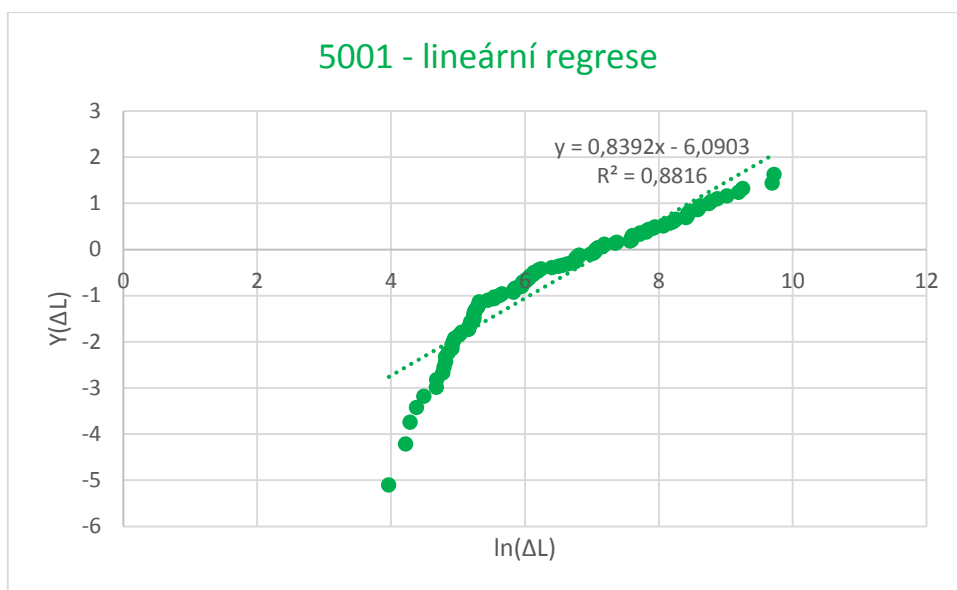
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

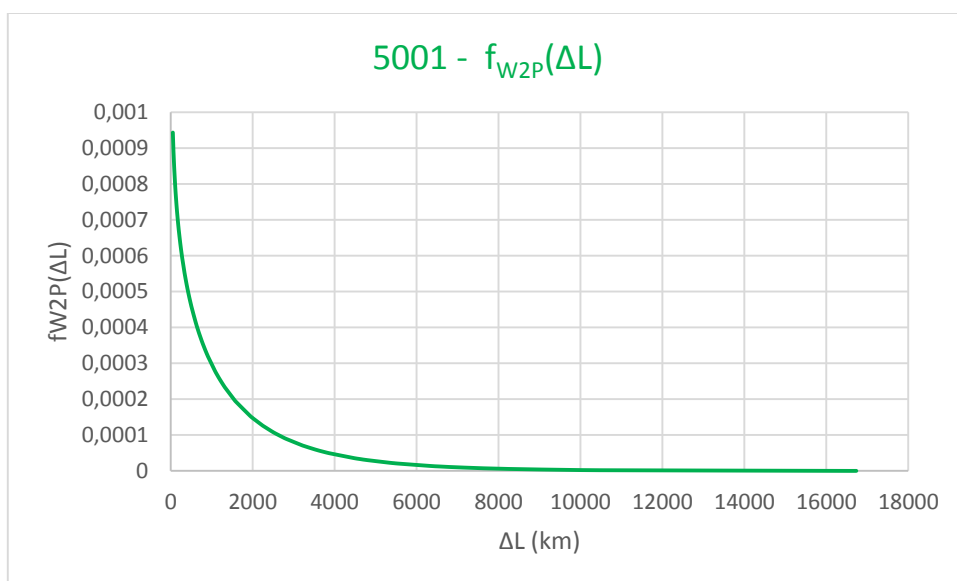
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{1023,9}\right)^{0,7825}} \quad (G.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

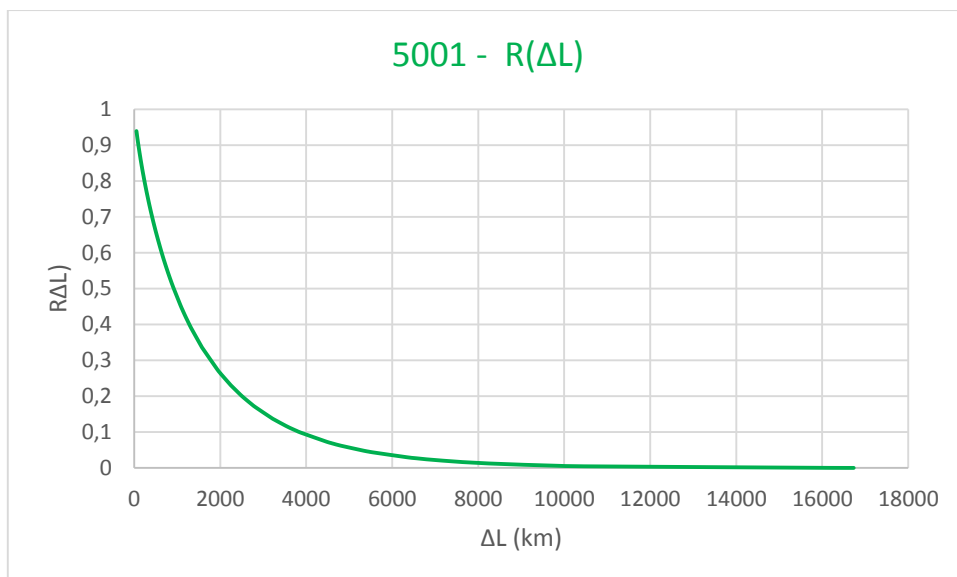
Příloha H – elektrobus 5001 jako celek



Obr. č. H.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. H.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. H.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. H.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	115
m	0,8392
-q	6,0903
R ²	0,8816
t ₀	1418,377
T _s	1555,684

Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

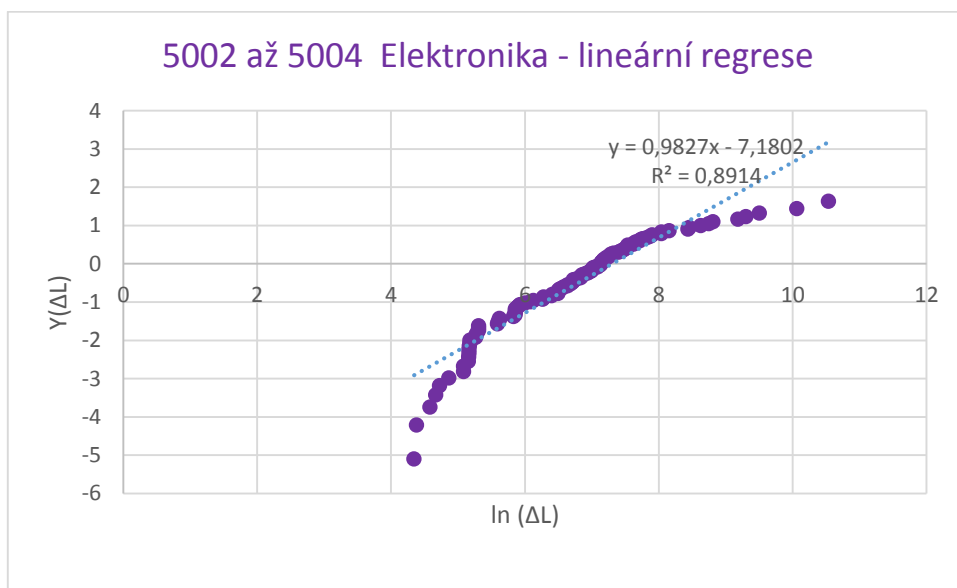
Rovnice pro distribuční funkci W2P:

$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{1418,33}\right)^{0,8392}} \quad (H.1)$$

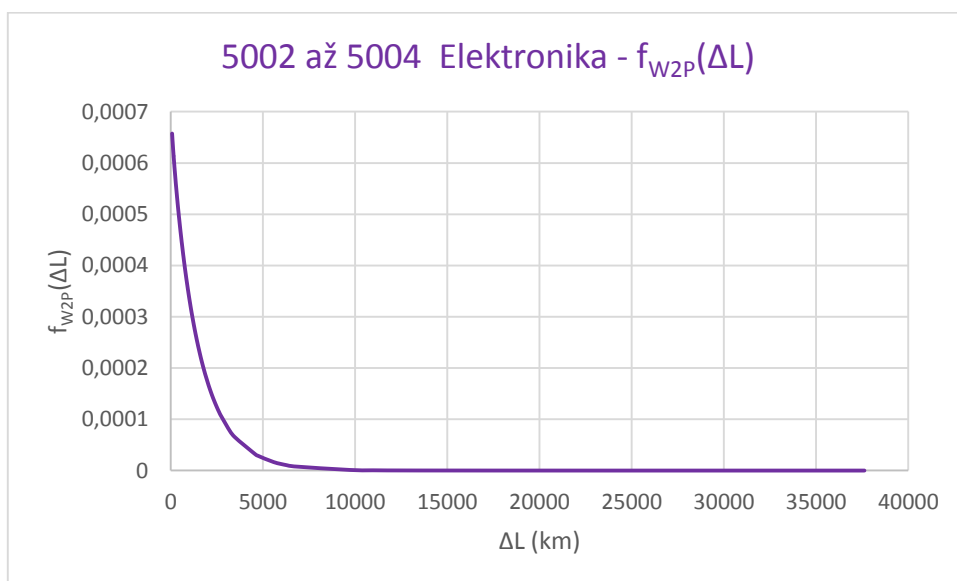
Poznámka: Test dobré shody Kolmogorov-Smirnov vyvrátil nulovou hypotézu, že toto vypočtené rozdělení pravděpodobnosti odpovídá výběrovému rozdělení pravděpodobnosti poruch.

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

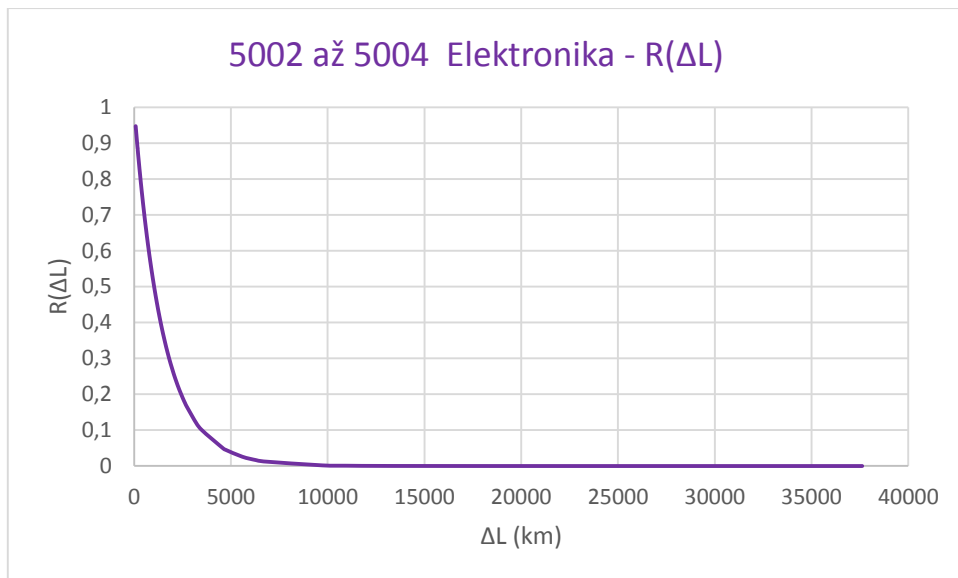
Příloha I – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina Elektronika



Obr. č. I.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. I.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. I.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. I.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	115
m	0,9827
-q	7,1802
R ²	0,8914
t ₀	1490,109
T _s	1501,39

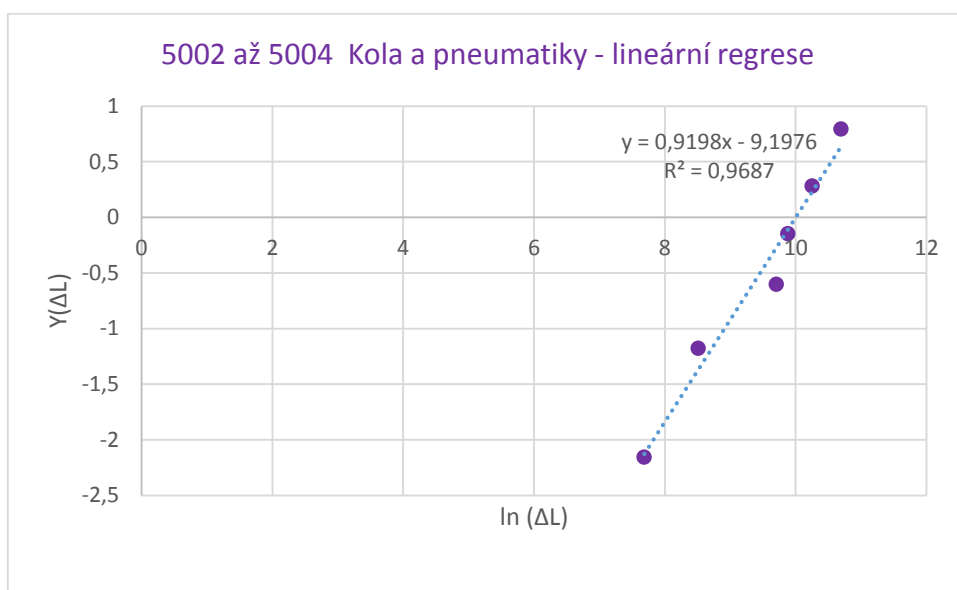
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

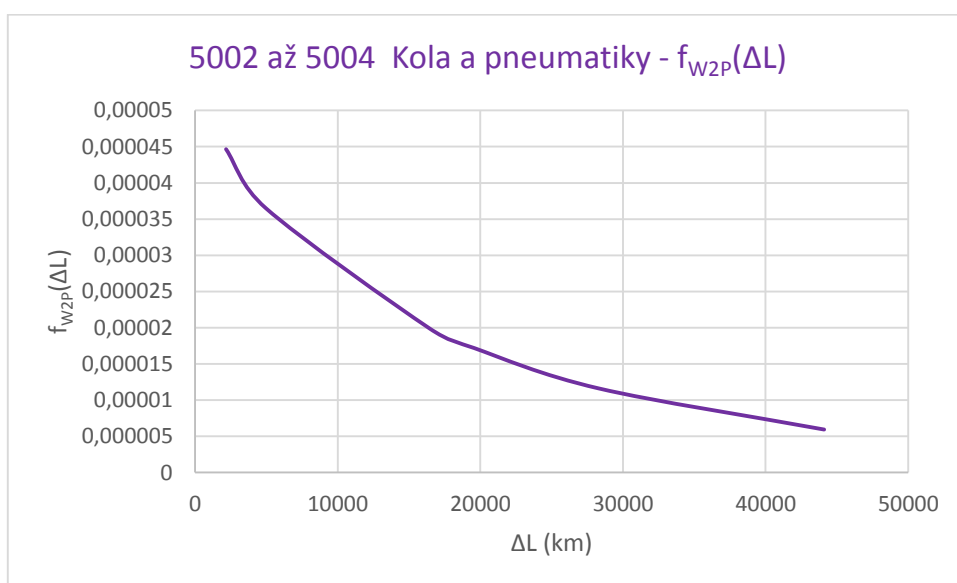
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{1490,109}\right)^{0,9827}} \quad (I.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

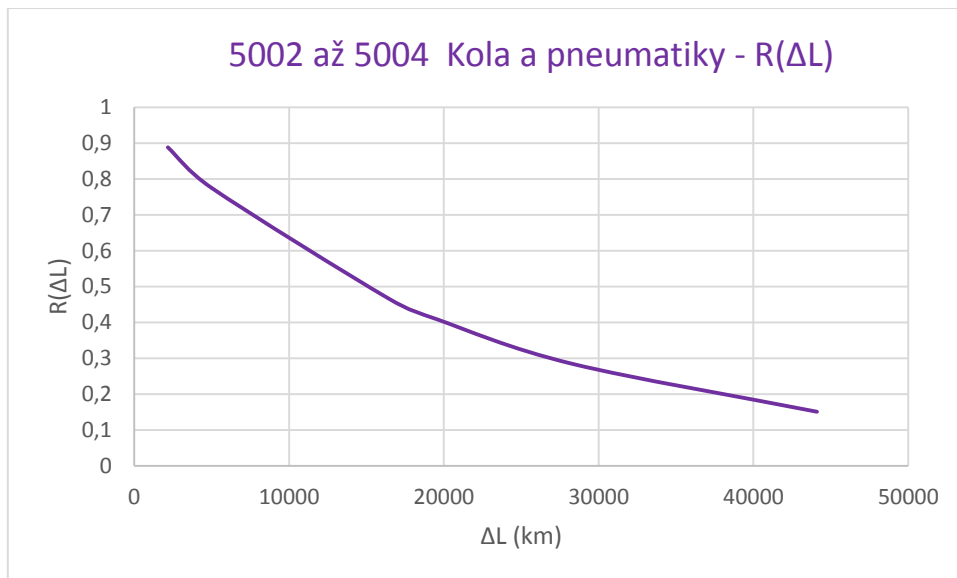
Příloha J – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina Kola a pneumatiky



Obr. č. J.1 Odhad parametrů W_{2P} lineární regrese [Autor]



Obr. č. J.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. J.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. J.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	6
m	0,9198
-q	9,1976
R ²	0,9687
t ₀	22016,89
T _s	22898,74

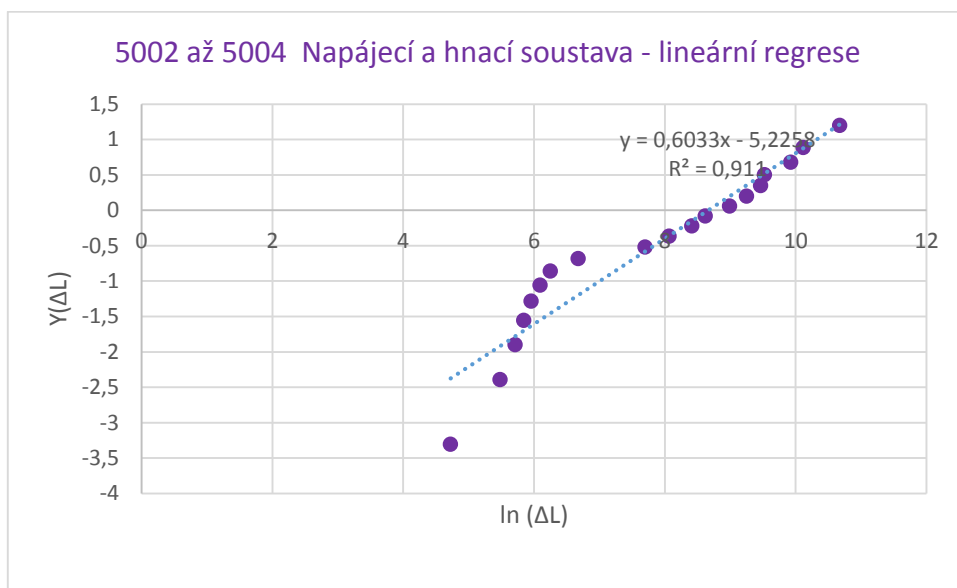
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

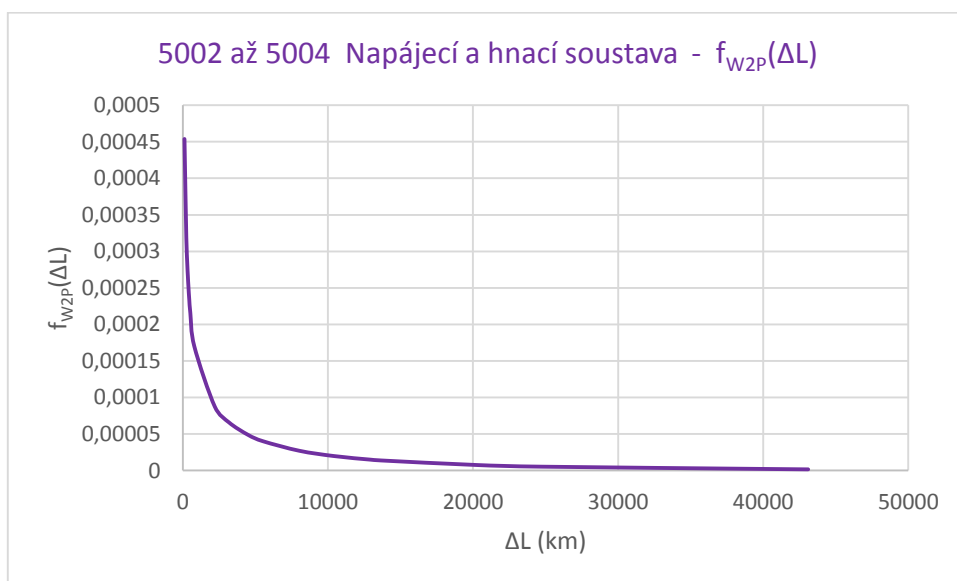
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{22016,89}\right)^{0,9198}} \quad (J.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

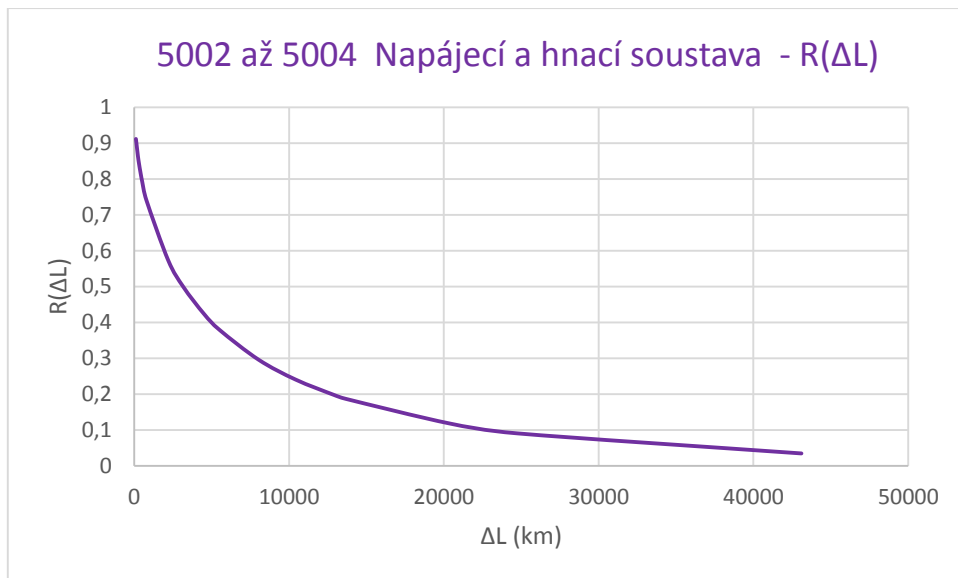
Příloha K – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina Napájecí a hnací soustava



Obr. č. K.1 Odhad parametrů W_{2P} lineární regrese [Autor]



Obr. č. K.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. K.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. K.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	19
m	0,6033
-q	5,2258
R ²	0,911
t ₀	5779,229
T _s	8633,698

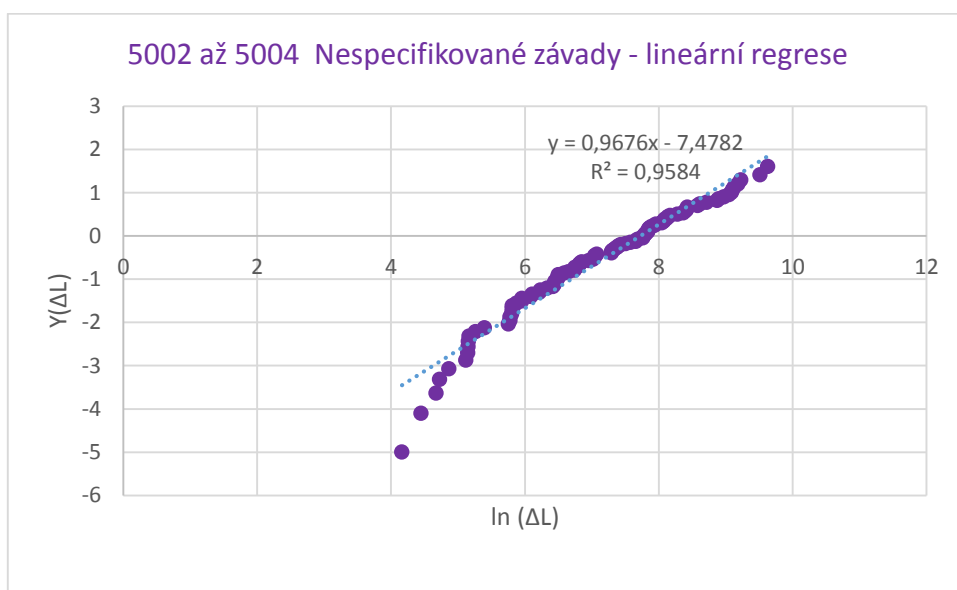
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

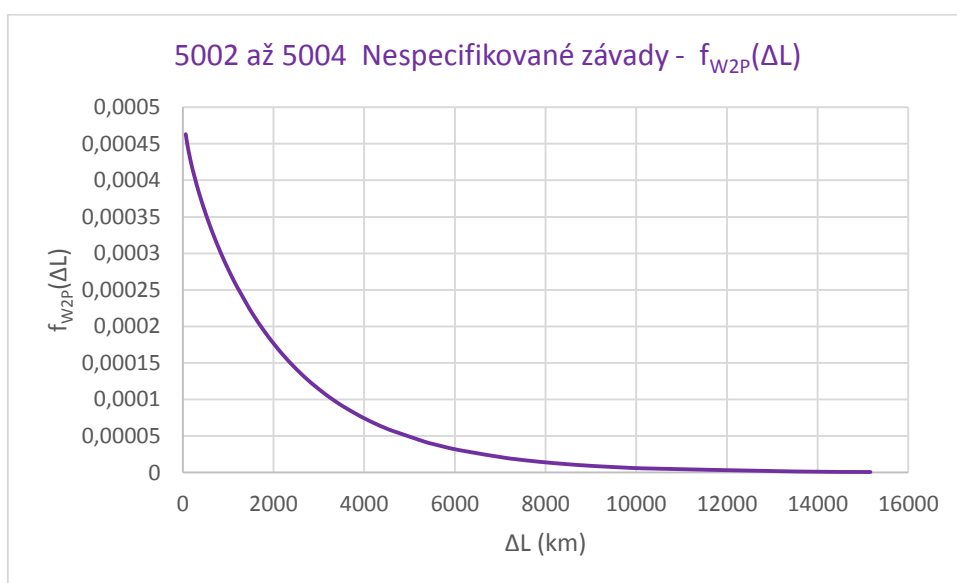
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{5779,229}\right)^{0,6033}} \quad (K.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

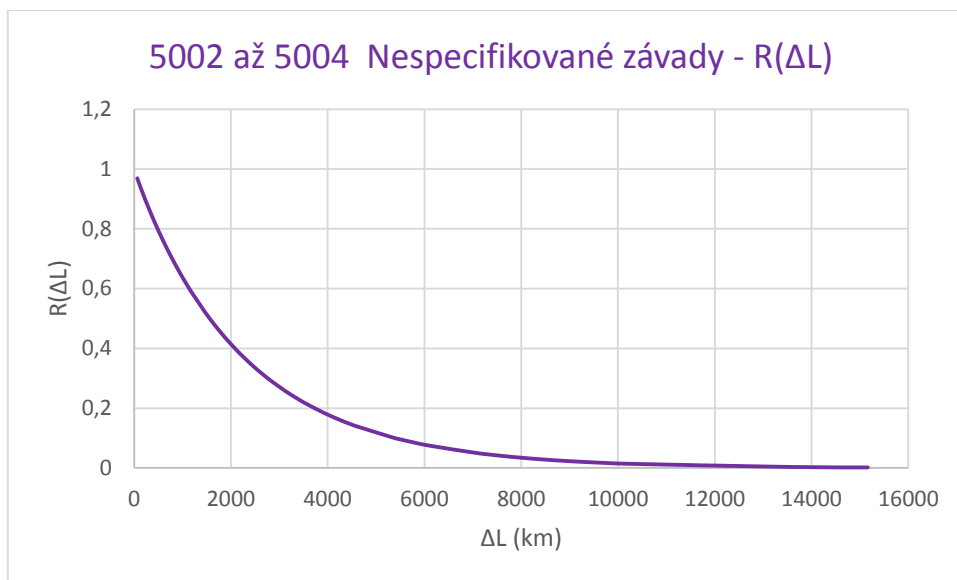
Příloha L – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina Nespecifikované opravy



Obr. č. L.1 Odhad parametrů W_{2P} lineární regrese [Autor]



Obr. č. L.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. L.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. B.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	103
m	0,9676
-q	7,4782
R ²	0,9584
t ₀	2272,434
T _s	2305,661

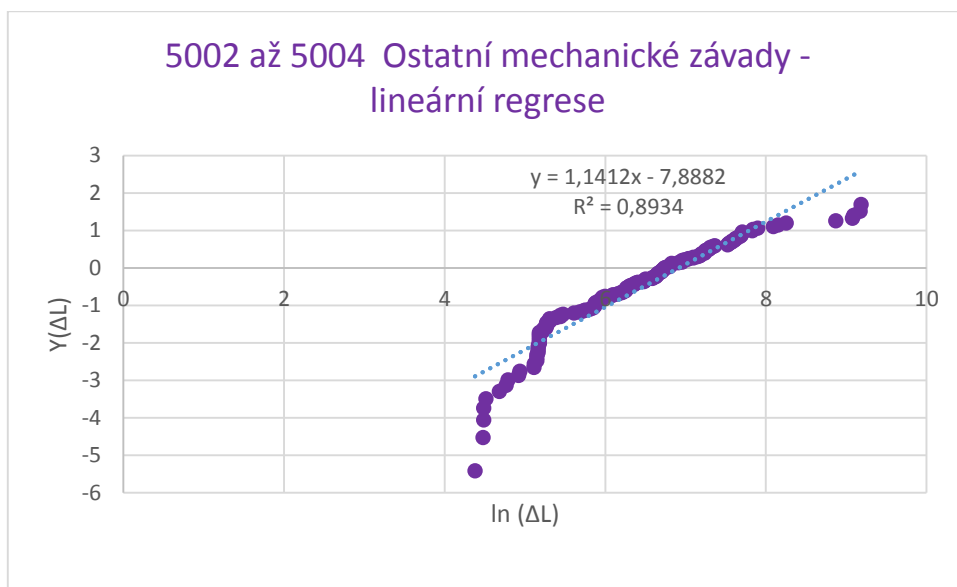
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

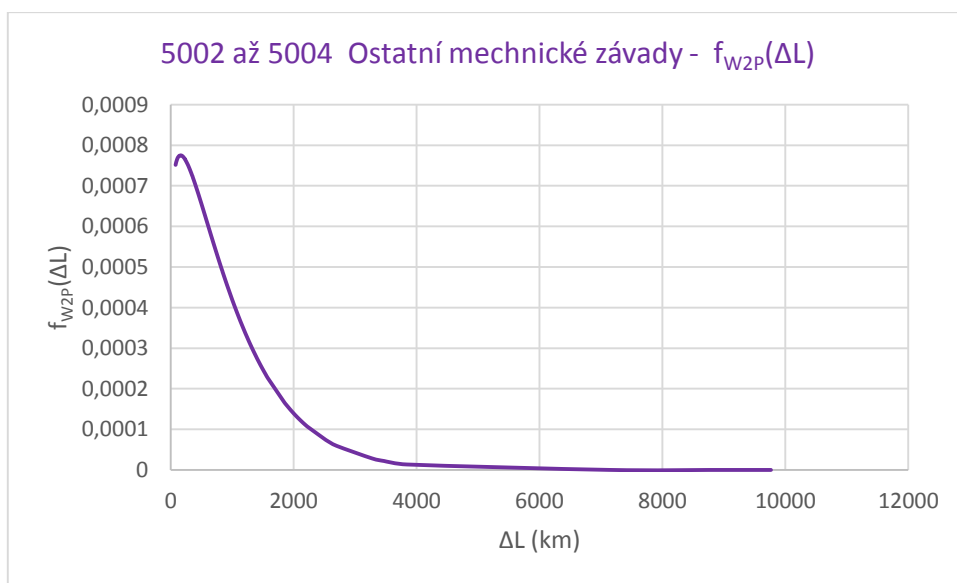
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{2272,434}\right)^{0,9676}} \quad (L.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

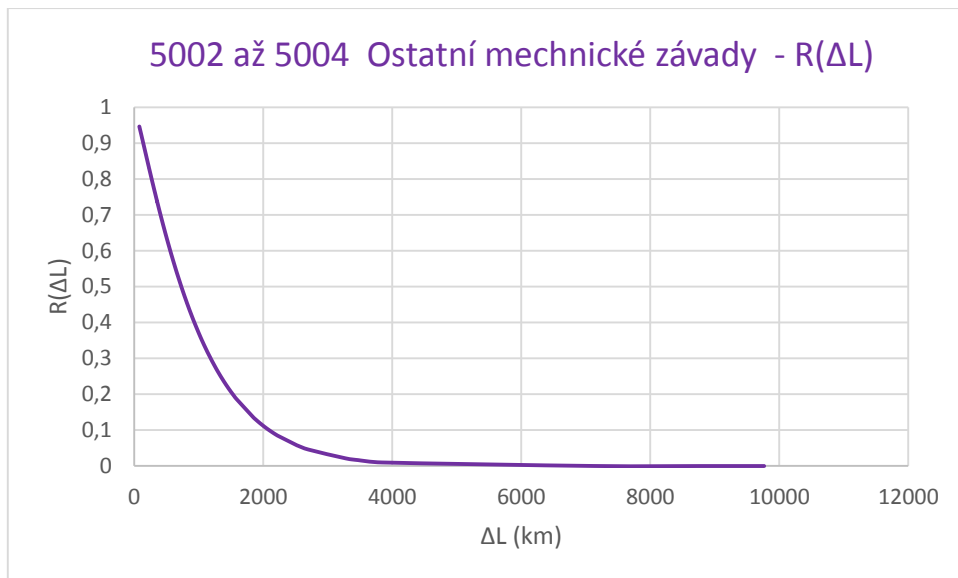
Příloha M – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004, skupina Ostatní mechanické závady



Obr. č. M.1 Odhad parametrů W2P lineární regrese [Autor]



Obr. č. M.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. M.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. M.1: Tabeleární přehled hodnot W2P [Autor]

N	157
m	1,1412
-q	7,8882
R ²	0,8934
t _o	1004,452
T _s	958,1038

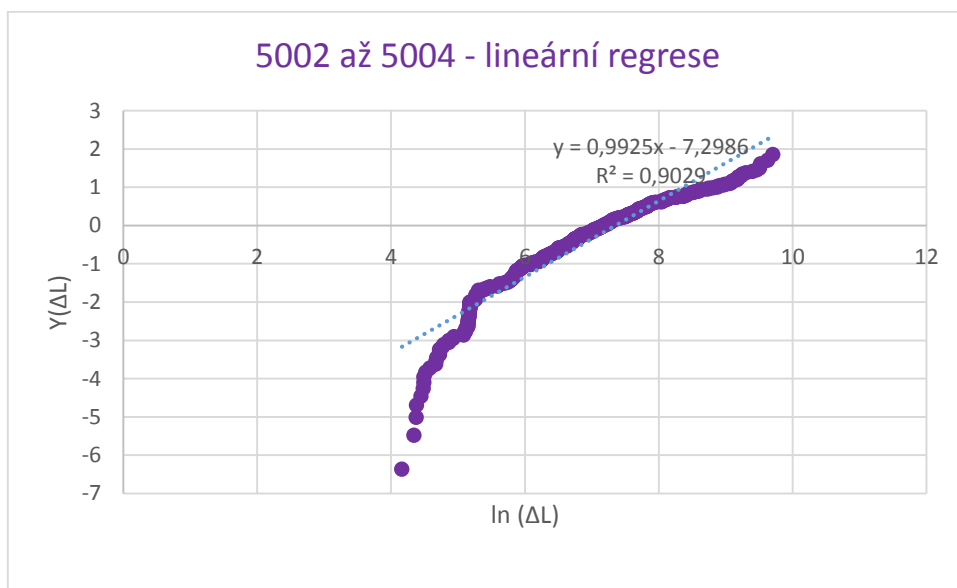
Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t_o [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

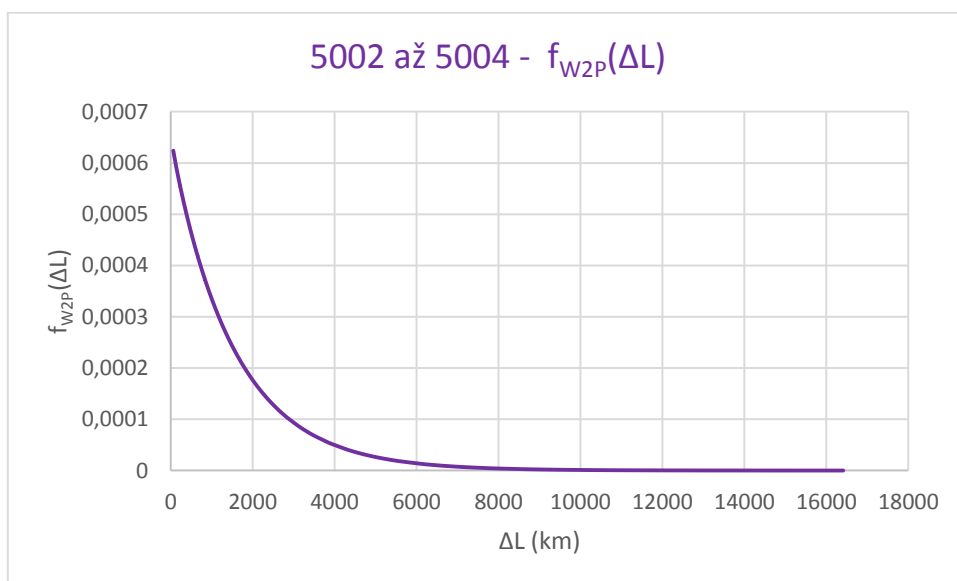
$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{1004,452}\right)^{1,1412}} \quad (M.1)$$

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.

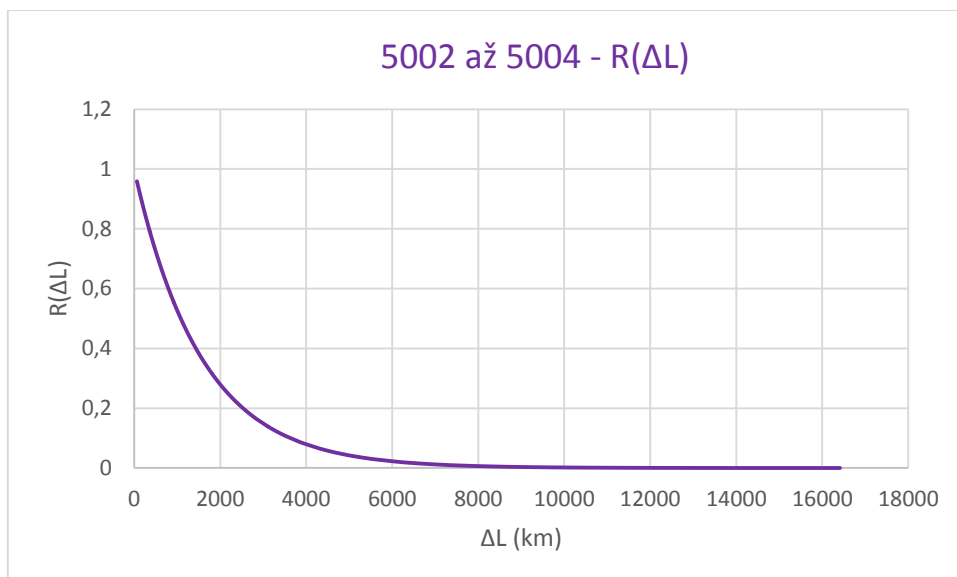
Příloha N – elektrobusy kusové výroby 5002 až 5004 jako celek



Obr. č. N.1 Odhad parametrů W_{2P} lineární regrese [Autor]



Obr. č. N.2 Graf hustoty pravděpodobnosti [Autor]



Obr. č. N.3 Graf provozní spolehlivosti [Autor]

Tabulka č. N.1: Tabelární přehled hodnot W2P [Autor]

N	407
m	0,9925
-q	7,2986
R ²	0,9029
t ₀	1562,048
T _s	1567,075

Kde N [-] je počet poruch, m [-] je parametr tvaru W2P, q [-] je hodnota posunutí regresní přímky po ose y, R [-] je index korelace, t₀ [km] je parametr měřítka a T_s [km] je střední hodnota W2P.

Rovnice pro distribuční funkci W2P:

$$F_{W2P}(\Delta L) = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta L}{1562,048}\right)^{0,9925}} \quad (N.1)$$

Poznámka: Test dobré shody Kolmogorov-Smirnov vyvrátil nulovou hypotézu, že toto vypočtené rozdělení pravděpodobnosti odpovídá výběrovému rozdělení pravděpodobnosti poruch.

Veškeré výpočty jsou přiloženy jako příloha na multimediálním nosiči.